

**EFEITOS DE SÓLIDOS TOTAIS DA ÁGUA
RESIDUÁRIA DE UMA SUINOCULTURA NO
DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE
IRRIGAÇÃO COM CARRETEL ENROLADOR**

ANTÔNIO CARLOS BARRETO

2007

ANTÔNIO CARLOS BARRETO

**EFEITOS DE SÓLIDOS TOTAIS DA ÁGUA RESIDUÁRIA DE UMA
SUINOCULTURA NO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE
IRRIGAÇÃO COM CARRETEL ENROLADOR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de “Doutor”.

Orientador

Prof. Dr. Cláudio Milton Montenegro Campos

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

2007

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Barreto, Antônio Carlos

Efeitos de sólidos totais da água residuária de uma suinocultura no desempenho de um sistema de irrigação com carretel enrolador / Antônio Carlos Barreto. -- Lavras : UFLA, 2007.

88 p. : il.

Orientador: Cláudio Milton Montenegro Campos.

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Água residuária. 2. Irrigação. 3. Suinocultura. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.587

ANTÔNIO CARLOS BARRETO

**EFEITOS DE SÓLIDOS TOTAIS DA ÁGUA RESIDUÁRIA DE UMA
SUINOCULTURA NO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE
IRRIGAÇÃO COM CARRETEL ENROLADOR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 11 de maio de 2007

Prof. Dr. Alberto Colombo	UFLA
Prof. Dr. Amilton Diniz e Souza	CEFET/UBERABA
Prof. Dr. Luiz Antônio Lima	UFLA
Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira	UFLA/UFG

Prof. Dr. Cláudio Milton Montenegro Campos

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS – BRASIL

AOS MEUS PAIS, WILSON e CARMELITA, os quais já não se encontram mais entre nós, pelos exemplos que foram em minha vida.
Aos meus irmãos, pela confiança e apoio incondicional.

OFEREÇO.

A minha esposa, Eliane e minha filha, Bethânia,
pela compreensão, carinho, companheirismo e apoio.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia, por todos esses anos de apoio.

Ao orientador, Prof. Dr. Cláudio Milton Montenegro Campos, pelos ensinamentos, atenção e amizade neste trabalho.

Aos professores e co-orientadores, Jacinto de Assunção Carvalho e Luiz Antônio Lima, pelo conhecimento compartilhado e atenção durante este trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Uberaba, pela confiança e incentivo em todos os momentos de elaboração deste trabalho.

À Empresa PLONA Equipamento de Curitiba, PR, na pessoa de Arno Bernert, por disponibilizar o aspersor RL250 para os ensaios técnicos.

Ao amigo Márcio José de Santana, pela presença, ensinamentos e amizade.

Aos colegas de curso Giuliani, Luis Alexandre e Dilson, pelo apoio e amizade.

Aos alunos do Curso Superior de Tecnologia em Irrigação e Drenagem (CSTID), Jussiane de Paula e Rogério Vasconcelos, pela ajuda e amizade durante todo experimento.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia (DEG/UFLA), pelo apoio técnico.

Aos meus familiares e demais amigos.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

A Deus, pela vida.

BIOGRAFIA

Antônio Carlos Barreto, filho de Wilson Barreto e Carmelita Antônia Barreto, nasceu em Lavras, MG, em 20 de fevereiro de 1967.

Em 1984, iniciou o 2º grau na Escola da Comunidade Juventino Dias, concluindo-o em 1986.

No ano de 1987, ingressou na Escola Superior de Agricultura de Lavras, onde, em 1992, concluiu o curso de Engenharia Agrícola. Em 1995, iniciou o mestrado em Engenharia Agrícola, concluindo-o em 1997. Em 1999 ingressou na Escola Agrotécnica Federal de Uberaba, hoje Centro Federal de Educação Tecnológica de Uberaba, onde é professor nas áreas de Irrigação e Topografia.

No ano de 2004, iniciou o Doutorado em Engenharia Agrícola.

SUMÁRIO

ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 Considerações gerais	4
2.2 Padrão de lançamento para água residuária de suinocultura.....	5
2.2.1 Produção de água residuária em uma suinocultura	6
2.2.2 Características físico-químicas da água residuária de suinocultura ..	7
2.2.3 Sistemas de distribuição de dejetos líquidos de suínos	9
2.3 Características do sistema de irrigação autopropelido	9
2.4 Uniformidade de distribuição de água pelo sistema de irrigação.....	10
2.5 Distribuição de gotas ao longo do raio do aspersor.....	12
2.6 Determinação de vazão	15
2.7 Perda de carga distribuída em tubulações	17
2.8 Potência absorvida da rede elétrica pelo sistema	27
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 Caracterização da área experimental.....	29
3.2 Caracterização do sistema de captação dos dejetos de suínos.....	29
3.3 Sistema de tratamento dos dejetos.....	30
3.4 Caracterização da água residuária	31
3.5 Caracterização do sistema de bombeamento.....	32
3.6 Caracterização e funcionamento do equipamento de irrigação.....	33
3.7 Delineamento experimental e análises estatísticas	37
3.8 Procedimentos de campo.....	38
3.8.1 Localização dos pontos de amostragem do fluido.....	39
3.8.2 Perda de carga na tubulação adutora	41
3.8.3 Perda de carga na turbina	41
3.8.4 Perda de carga na mangueira.....	41

3.8.5 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).....	42
3.8.6 Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor.....	42
3.8.7 Determinação do alcance do aspersor na faixa molhada.....	42
3.8.8 Potência exigida da rede elétrica pelo sistema	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 Dados climáticos	46
4.2 Caracterização física do dejetos.....	47
4.3 Calibração do medidor de vazão	48
4.4 Perda de carga média avaliada na adutora.....	50
4.5 Perda de carga média avaliada na turbina	54
4.6 Perda de carga média avaliada na mangueira.....	55
4.7 Uniformidade de distribuição	58
4.7.1 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).....	58
4.7.2 Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor.....	61
4.8 Alcance do aspersor na faixa molhada.....	62
4.9 Rendimento da bomba.....	64
4.10 Potência exigida da rede elétrica pelo sistema	65
4.11 Síntese dos resultados.....	67
5 CONCLUSÕES.....	69
6 RECOMENDAÇÕES	70
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
8 ANEXOS.....	75
8.1 Anexo A	75
8.2 Anexo B.....	81
8.3 Anexo C.....	87

RESUMO

BARRETO, Antônio Carlos. **Efeito de sólidos totais da água residuária de uma suinocultura no desempenho de um sistema de irrigação com carretel enrolador.** 2007. 88 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.¹

Este experimento foi conduzido na Unidade I do Centro Federal de Educação Tecnológica de Uberaba (CEFET), em Uberaba, MG, durante o ano de 2006. O objetivo foi avaliar a influência da concentração de sólidos totais contidos na água residuária de suinocultura nas perdas de cargas ocorridas no sistema, na uniformidade de distribuição, na distribuição de sólidos totais ao longo do alcance do aspersor, no alcance do aspersor, rendimento da bomba e na potência exigida da rede elétrica pelo sistema. Os tratamentos constaram das concentrações de sólidos totais contidos em cada camada da lagoa retirada durante o ensaio. Utilizaram-se um sistema de irrigação autopropelido da marca Metal Lavras, modelo mini 63/150, equipado com um canhão da marca Plona modelo RL 250 e um sistema de bombeamento composto por uma bomba da marca Schneider modelo MSA-22 R 1 ¼” acoplada a um motor trifásico de 15 c.v. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições. As perdas de carga foram influenciadas diretamente pela concentração dos sólidos contidos na água residuária, chegando a acréscimos de 30,12% na adutora, 11,93% na turbina e 20,55% na mangueira, para a maior concentração de sólidos avaliada em relação à água sem resíduo. Na uniformidade de distribuição e no alcance do aspersor, não houve influência significativa da concentração de sólidos. Na distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor, observou-se maior concentração nos coletores mais afastados do aspersor. O rendimento da bomba foi influenciado pela concentração de sólidos totais, tendo uma redução de 9% para a maior concentração em relação ao tratamento sem resíduo. A potência exigida da rede elétrica pelo sistema foi influenciada pela concentração de sólidos, constatando-se um acréscimo de 8,28% para a concentração 34.168 mg L⁻¹ de sólidos totais em relação à água sem resíduo.

¹ Comitê Orientador: Cláudio Milton Montenegro Campos (Orientador), Jacinto de Assunção Carvalho e Luiz Antônio Lima (Co-orientadores).

ABSTRACT

BARRETO, Antônio Carlos. **Effect of total solids of the wastewater of a swine in the acting of an overhead irrigation with spool traveler**. 2007. 88 p. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering/Irrigation and Drainage) – Federal University of Lavras, Lavras².

This experiment was carried out at Unit I at the Federal Technological Education Center in Uberaba (CEFET-Uberaba-MG), during the year of 2006. The objective was to evaluate the influence of solids concentration in swine wastewater on head losses of the irrigation system, on water distribution uniformity, on distribution of solids along the sprinkler radius of throw, pump efficiency and horsepower required by the pump at the electric system. The treatment levels were solid concentration at different depths of a water in a stabilization pond. The irrigation self propelled system was manufactured by Metal Lavras, model mini 63/150, with a gun sprinkler model Plona RL 250 and a pump system with a Schneider unit model MSA-22R 1/14" with a three phase electrical engine 15 HP. The experimental design was randomized blocks with three replicates. The head losses were influenced by the solids concentration increasing the losses in 30,12% at the main pipe, 11,93% at the turbine and 20,55% at the plastic hose, for the largest solid concentration compared to water only. The water distribution uniformity and radius of throw statistical differences were not observed. It was observed that solids application varied along the radius of throw, being larger quantities applied at the larger distances. Pump efficiency was affected by solid concentrations, being reduced as much as by 9% for the largest solid concentration. The horsepower required was also influenced by the solid concentration of 34168 mg L⁻¹, being increased in 8,28% when compared to pure water.

² Guidance Committee: Cláudio Milton Montenegro Campos (Adviser), Jacinto de Assunção Carvalho and Luiz Antônio Lima (Co-advisers)

1 INTRODUÇÃO

A atual expansão da suinocultura tem como característica a alta concentração de animais por área. Como consequência, se torna uma atividade de baixa qualidade ambiental, poluindo as águas, os solos, afetando a qualidade do ar com emissão de maus odores e pela proliferação de insetos, ocasionando desconforto à população.

Os grandes centros mundiais produtores de suínos, tais como a Europa e os Estados Unidos, já enfrentam dificuldades para manter os seus atuais rebanhos, em função do excesso de dejetos.

O Brasil possui o quarto maior plantel de suínos do mundo com, aproximadamente, 34,5 milhões de cabeças. Deste total, 3,4 milhões estão alojados no estado de Minas Gerais, onde a atividade tem importante contribuição econômica (ANUALPEC, 2006).

Tendo o Brasil clima favorável e disponibilidade de área para um aumento potencial de seu rebanho, deve-se buscar uma forma de manejar adequadamente os dejetos de suínos. Este é um grande desafio para o setor de pesquisas do país, ou seja, garantir o aumento da produção, sem perder de vista a qualidade ambiental.

No estado de Minas Gerais, na busca por novas fronteiras de exploração do setor de suinocultura, a região do Triângulo Mineiro destaca-se como um importante pólo de produção baseado no modelo de integração, no qual a indústria é responsável pelos insumos e suporte técnico e o produtor pelas instalações e mão-de-obra. Trata-se de modelo bastante empregado também nos Estados Unidos.

Muitos estudos vêm sendo realizados na busca da forma adequada de destinação dos dejetos líquidos de suínos. Uma recomendação técnica é o

armazenamento e o tratamento em esterqueiras ou lagoas, para posterior uso como fertilizantes nas lavouras (Dartora, 1998; Konzen, 2003a; Oliveira, 2002).

Existem várias formas de aplicação nas culturas dos dejetos líquidos tratados. Dentre elas, pode-se destacar a aplicação via irrigação por aspersão. Entre os vários sistemas de irrigação por aspersão, destaca-se o equipamento autopropelido, que vem sendo utilizado de forma a reduzir a mão-de-obra despendida na aplicação. Este é um equipamento semi-automático, pois possui um dispositivo que promove a locomoção do aspersor, enquanto este faz a distribuição do líquido na área irrigada.

Dentre os sistemas de irrigação por aspersão, o autopropelido é considerado um equipamento que utiliza grandes potências, pois necessita de alta pressão no bombeamento para o seu bom deslocamento e para garantir, assim, a uniformidade de distribuição do líquido.

Para que uma irrigação apresente uniformidade de distribuição satisfatória é necessário conhecer as suas características hidráulicas, bem como as características físicas do líquido a ser distribuído pelo sistema.

Segundo o teorema de Bernoulli, o escoamento de um fluido em condutos forçados ou livres promove uma perda de carga, que é proveniente do atrito interno das partículas do fluido e ou da viscosidade. A perda de carga é afetada diretamente pela viscosidade do fluido, que é alterada pela concentração de sólidos totais dispersos, dentre outros fatores. Sendo o fluido utilizado neste trabalho água residuária de suinocultura, esperam-se valores diferenciados para a viscosidade e a perda de carga, quando comparado à água.

A influência das características físicas de águas residuárias de suinocultura no bombeamento, no escoamento em tubulação e na uniformidade de distribuição, por parte dos equipamentos de irrigação, é praticamente desconhecida, podendo proporcionar erros em aplicações destes líquidos, principalmente nos cálculos hidráulicos para projetos. No intuito de estudar a

relação entre a concentração de sólidos totais dispersos na água residuária de suinocultura e seus efeitos nos parâmetros hidráulicos de um sistema de irrigação autopropelido, são levantadas algumas hipóteses para este estudo, tais como:

- a concentração de sólidos totais nas águas residuárias de suinocultura altera as suas características hidráulicas de escoamento?
- a perda de carga é afetada pela concentração de sólidos totais contidos na água residuária de suinocultura?
- a uniformidade de aplicação de água pelos equipamentos de irrigação é afetada pela concentração de sólidos totais presentes na água de irrigação?
- O rendimento da bomba é afetado pela concentração de sólidos totais contidos na água residuária de suinocultura?
- a exigência de potência pelo sistema de bombeamento é a mesma daquela no bombeamento de água sem resíduos sólidos?

Com base no exposto, o presente trabalho objetiva: avaliar a perda de carga distribuída nas tubulações que compõem o sistema de irrigação; verificar a influência da concentração de sólidos totais na uniformidade de aplicação do sistema de irrigação e verificar a distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor; verificar a influência da concentração de sólidos totais contidos na água residuária distribuída no alcance do aspersor e determinar o rendimento da bomba e a potência exigida, da rede elétrica, pelo sistema, para bombeamento em diferentes concentrações de sólidos totais contidas na água residuária de suinocultura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Considerações gerais

A política ambiental aplicada nos países da Europa e da América do Norte tem tido repercussão nos diversos setores produtivos brasileiros, em especial o setor da produção de carne suína.

A produção familiar tem sido responsável pelo desenvolvimento dessa atividade em pequenas propriedades, sob regime de integração com as agroindústrias. Desde o início do século passado, especialmente nos estados do Sul do Brasil, ela tem sido praticada pelos agricultores para a sobrevivência familiar.

Nos últimos anos, tem-se destacado o potencial das regiões de cerrado no Brasil para o desenvolvimento de uma suinocultura moderna e eficiente, sob um novo padrão organizacional que preconiza a produção em grande escala.

O surgimento de novos modelos de integração no Centro-Oeste e no Triângulo Mineiro tem promovido a concentração da produção de suínos. Com isso, surgem os problemas ambientais referentes à concentração destes dejetos.

Segundo Cleps Júnior & Pelegrini (2001), havia grande crescimento no número de projetos de criação de suínos em fase de implantação no Brasil, indicando um alojamento previsto de 233.000 matrizes até 2005. Deste total, 178.000 matrizes, correspondente a 76,39%, seriam alojadas em granjas das regiões Centro-Oeste e Triângulo Mineiro, que correspondem também aos maiores projetos de criação.

Segundo o mesmo autor, a integradora que atua na região do Triângulo Mineiro conta com um grupo de aproximadamente 100 produtores integrados com suínos. A área média das propriedades destes produtores é de 368,61 ha,

existindo áreas com 26 ha até 1.800 ha, situadas em um raio de 140 km de Uberlândia, MG.

A maioria dos produtores utiliza os dejetos dos suínos na adubação do solo, empregando sistemas de irrigação por aspersão com conjunto motobomba, acionados por motores elétricos, na distribuição do material em pastagens, dentre outras culturas.

Por meio da utilização das águas de abastecimento por duas vezes, uma para uso em atividade de produção animal e outra para irrigação, os “poluentes” em potencial tornam-se fertilizantes importantes para o meio agrícola, incrementando a produção e a produtividade agrícola e impedindo, caso haja controle, a poluição e a contaminação dos rios e lagos e os solos. Isso, por sua vez, propicia uma fonte natural e limpa para o suprimento e abastecimento de água.

2.2 Padrão de lançamento para água residuária de suinocultura

A Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, o CONAMA (Brasil, 2005), estabelece a classificação dos corpos d’água no território nacional, segundo a qualidade requerida para os seus usos proponentes, em treze classes de qualidade. Dessas são consideradas cinco classes para as águas doce, quatro classes para as águas consideradas salinas e quatro classes para as águas consideradas salobras. A resolução ainda estabelece os padrões de lançamento para efluentes com seus respectivos limites máximos para cada poluente e para cada classe do corpo de água.

A legislação ambiental do estado de Minas Gerais, segundo normativa do COPAM 010/86 (Minas Gerais, 1986), estabelece, em seu artigo 15, que efluente de qualquer fonte poluidora somente poderá ser lançado, direta ou indiretamente, nos corpos de água, desde que atenda aos seguintes requisitos:

- pH entre 6,5 e 8,5 (mais ou menos 0,5);
- temperatura menor que 40°C;
- ausência de materiais flutuantes;
- DBO₅, a 20°C, no máximo de 60 mg L⁻¹;
- ausência de materiais flutuantes;
- concentração máxima diária de sólidos suspensos de 100 mg L⁻¹;
- concentração média mensal de sólidos suspensos de 60 mg L⁻¹.

2.2.1 Produção de água residuária em uma suinocultura

Os sistemas de produção de suínos existentes no Brasil propiciam elevada produção de dejetos líquidos. A concepção das edificações, a alimentação, o tipo de bebedouros e o sistema de limpeza e manejo determinam, basicamente, as características e o volume total dos dejetos produzidos nos diferentes sistemas de criação.

O conhecimento da quantidade total de dejetos produzidos por um suíno, em determinada fase de seu desenvolvimento, é de fundamental importância para o planejamento das instalações de coleta e estocagem, bem como a definição dos equipamentos de distribuição do mesmo.

Segundo Dartora (1998), as quantidades de fezes e urina excretadas por um suíno são afetadas por vários fatores zootécnicos (tamanho, sexo, raça e atividade), ambientais (temperatura e umidade) e dietéticos (digestibilidade, conteúdo de fibra e proteína).

Para o tratamento e a posterior utilização dos dejetos de suínos, torna-se necessário conhecer o volume produzido diariamente e a sua composição. Segundo Konzen (2003b), em sistemas de criação de ciclo completo, produz-se um volume diário por matriz alojada que varia entre 140 a 170 L dia⁻¹; em núcleos de produção de leitões, o volume gerado por animal é de 35 a 40 L dia⁻¹.

e, na terminação (animais de 25 a 100 kg), a produção diária varia de 12 a 15 litros por suíno. Estes valores devem ser acrescidos de 20% para o cálculo da capacidade do sistema de armazenamento como forma de segurança.

2.2.2 Características físico-químicas da água residuária de suinocultura

As características físico-químicas dos dejetos estão associadas ao sistema adotado para manejo dos animais e aos aspectos quantitativos e qualitativos da alimentação e higienização aplicados dentro da unidade de produção.

Na Tabela 1, segundo Konzen (1980), citado por Oliveira (1993), apresentam-se as características físico-químicas dos dejetos líquidos de suínos para as unidades de crescimento e terminação, na qual se observa baixa precisão desses valores, baseando-se no coeficiente de variação apresentado.

TABELA 1. Características físico-químicas dos dejetos de suínos

Parâmetro	Média	Coeficiente de variação (%)
pH	6,94	2,45
Matéria seca (%)	8,99	13,68
Sólidos totais/ST (%)	9,00	27,33
Sólidos voláteis/SV (%)	75,05	5,86
Nitrogênio total (%)	0,60	8,33
Fósforo (%)	0,25	28,00
Potássio (%)	0,12	33,33
DBO ₅ (g L ⁻¹)	52,27	22,71
DQO (g dia ⁻¹)	98,65	17,32

Fonte: Konzen (1980) citado por Oliveira (1993).

Segundo Konzen (2003b), o conhecimento dessas características é de fundamental importância para o manejo e a distribuição deste material nas lavouras como forma de adubação.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da Norma Brasileira de Regulamentação NBR 10664 (1989), descreve o procedimento para a determinação da concentração de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis contidos em águas residuárias.

A Tabela 2, baseada por Oliveira (2002), traz as características dos dejetos de suínos, sem considerar a diluição que possa ocorrer pelo excesso de água desperdiçada na limpeza e pelos bebedouros.

TABELA 2. Características dos dejetos suínos, considerando somente esterco e a urina expresso por 1.000 kg de peso vivo.

Parâmetro	Valor	Desvio padrão
Volume total (kg)	84	24
Urina (kg)	39	4,8
Densidade (kg m ⁻³)	990	24
Sólidos totais (kg)	11	6,3
Sólidos voláteis (kg)	8,5	0,66
DBO ₂ (kg)	3,1	0,72
DQO (kg)	8,4	3,7
pH	7,5	0,57
Nitrogênio total (kg)	0,52	0,21
Nitrogênio amoniacal (kg)	0,29	0,10
Fósforo total (kg)	0,18	0,10
Potássio total (kg)	0,29	0,16

Fonte: ASAE (1993) citado por Oliveira 2002.

2.2.3 Sistemas de distribuição de dejetos líquidos de suínos

A distribuição do dejetos de suíno no campo pode ser realizada de várias formas. Dentre elas, as mais utilizadas são com a utilização do tanque mecanizado e do sistema de aspersão. O sistema de distribuição por aspersão permite uma distribuição uniforme do material. Com um mesmo valor de investimento, pode-se fertilizar uma área de até 50% a mais do que com a utilização de um tanque mecanizado. Além disso, não há limitações relativas a trânsito, em função da topografia (Konzen, 2003a).

Para a EPAGRI-SC (1989), citado por Konzen (2003b), a distribuição de dejetos líquido, via sistema de aspersão para áreas menores que 6 ha, se torna mais onerosa do que com o tanque de distribuição mecanizado; já para área de 12 ha, estes custos se equivalem e, para áreas acima de 18 ha, o custo da aspersão decresce em relação ao do tanque mecanizado.

2.3 Características do sistema de irrigação autopropelido

A irrigação por aspersão com sistema autopropelido surgiu porque o mercado de irrigação passou a exigir, cada vez mais, áreas maiores, com menor utilização de mão-de-obra.

Segundo Bernardo (1989), o sistema de irrigação autopropelido consiste em um aspersor de médio ou grande alcance, montado sobre uma carreta com uma unidade acionadora, carretel enrolador de mangueira, o qual pode ser tracionado por meio de cabo de aço ou pela própria mangueira e uma tubulação que faz a conexão da unidade com a linha adutora e o sistema de bombeamento.

Existem dois sistemas que proporcionam movimento ao sistema de acionamento do autopropelido: pistão hidráulico e turbina. Oakes & Rochester (1986), citados por Charmelo (1990), concluíram que as perdas de carga

provocadas pelo sistema de acionamento são de 6% e 7% da pressão de entrada no sistema, para sistemas equipados com pistão hidráulico e turbina, respectivamente.

Rocha (1998) e Rocha (2000), avaliando equipamentos autopropelidos, verificaram valores de perdas de carga na turbina da ordem de 30 mca e 9 mca, respectivamente, e que a perda de carga na mangueira aumentou com o seu enrolamento no carretel. Constataram, ainda, que a uniformidade de distribuição de água pelo aspersor foi diretamente influenciada pela constância e pela velocidade de recolhimento do carroaspersor.

2.4 Uniformidade de distribuição de água pelo sistema de irrigação

Os sistemas de irrigação aplicam água na forma de chuva artificial, de modo a suprir as necessidades das plantas. Ela deve ser feita de forma satisfatória, em quantidade e em uniformidade.

A uniformidade de aplicação de água por um sistema de irrigação autopropelido é influenciada pelo tipo de aspersor e pelo perfil de distribuição de água, além da largura da faixa irrigada, da pressão de serviço, da velocidade de deslocamento do aspersor, da velocidade e da direção do vento, da altura do aspersor, do diâmetro e do tipo de bocais do aspersor (Bernardo, 1989; Pair, 1968; Rosa, 1986 e Tomazela, 1996).

Segundo Tarjuelo (2005), a velocidade do vento é a principal variável que influencia a uniformidade de distribuição de água por um aspersor, que classifica como fraca, para velocidades de 0 a 2 m s⁻¹; mediana para velocidades de 2,1 a 4 m s⁻¹ e vento forte, com velocidade acima de 4 m s⁻¹. O autor comenta ainda que a uniformidade de distribuição diminui 20% quando a velocidade do vento passa de velocidades inferiores a 2 m s⁻¹ para velocidades superiores a 4 m

s^{-1} , recomendando os espaçamentos entre faixa de irrigação, conforme mostrado na Tabela 3.

TABEL 3. Espaçamento entre faixas de irrigação, em função da velocidade do vento.

Velocidade de vento ($m s^{-1}$)	Espaçamento (% diâmetro molhado pelo aspersor)
0,0-1,0	80
1,0-2,5	75-70
2,5-5,0	65-60
maior que 5,0	55-50

Segundo Vilela (1999), a Associação Brasileira de Normas Técnicas não tem norma específica para avaliação de aspersores autopropelidos, portanto, para avaliação destes equipamentos, deve-se basear em normas internacionais, tais como a ISO 7749/2 (1990) e a ISO 8224/1 (2003).

Existem várias equações para calcular a uniformidade de aplicação de um sistema de irrigação, dentre estas, Bernardo (1989) cita a equação de cálculo do coeficiente de uniformidade, proposta por Christiansen, em 1942 (Equação 1), recomendada pelo Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos.

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{nx} \right) \quad (1)$$

em que:

CUC = coeficiente de uniformidade Christiansen (%);

x_i = precipitação observada em cada pluviômetro (mm);

\bar{x} = precipitação média coletada (mm);

n = número de pluviômetro ou coletor.

Rocha (1998), avaliando a influência da pressão de serviço do aspersor e ângulos setoriais de aplicação de água em sistema autopropelido, encontrou valores de CUC variando entre 72% e 83%, os quais são considerados normais para este tipo de equipamento.

Rocha (2000), simulando largura de faixa de irrigação variando de 60% a 100% do diâmetro molhado pelo aspersor instalado em um equipamento autopropelido, encontrou valores de CUC variando entre 55%, para maiores larguras de faixa e até 93%, para as menores larguras. Este autor concluiu que os maiores valores de CUC foram encontrados para larguras de faixa que correspondem de 70% a 80% do diâmetro molhado pelo aspersor.

Drumond et al. (2005), avaliando a uniformidade de distribuição de água superficial e subsuperficial de água e água residuária de suinocultura com irrigação em aspersão em malha, observaram um decréscimo na vazão e no coeficiente de uniformidade do sistema com o aumento das doses de aplicação, ao longo de um ano de experimento.

2.5 Distribuição de gotas ao longo do raio do aspersor

Segundo Khol (1974), a resistência do ar contra a superfície do jato de água que sai do aspersor não é suficiente para fracioná-lo. Tal resistência é, aproximadamente, proporcional ao quadrado da velocidade do jato e à área de sua seção transversal. As partes mais externas do jato formam gotas que imediatamente caem como névoa e a parte central se desintegra em seu percurso.

As gotas emitidas por um aspersor dependem de vários fatores, como, por exemplo, pressão de serviço, ângulo de emissão e altura do aspersor.

Seginer (1965) propôs a Equação 2 para a força de resistência do ar e ainda propôs a Equação 3 para o cálculo da aceleração de arrastamento das gotas produzidas por um aspersor.

$$Fr = m.f \quad (2)$$

em que:

Fr = força de resistência do ar (N);

m = massa da gota (kg);

f = aceleração de arrastamento ($m\ s^{-2}$).

$$f = C_2.V^2 \quad (3)$$

em que:

C_2 = coeficiente de arrastamento (m^{-1});

V = velocidade de deslocamento da gota ($m\ s^{-1}$).

Hills (1988) propõe a Equação 4 para o cálculo de C_2 .¹

$$C_2 = \frac{0,804 - 0,264.D + 0,066.D^2 - 0,004.D^3}{1,109.D} \quad (4)$$

em que:

D = diâmetro da gota (mm).

¹ Hill, D. University of Califórnia. Advanced sprinkler irrigation. 1988. (notas de aula)

Com base na teoria da balística de uma gota de água emitida por um aspersor, pode-se dividir a trajetória das gotas em dois tipos de movimento: ascendente e descendente (Seginer, 1965).

Lima (1995) apresenta a Equação 5 para a velocidade resultante de uma gota.²

$$\frac{dV_R}{dt} = \sqrt{C_2^2 \cdot V_r \pm 2 \cdot C_2 \cdot V_R^2 \cdot \text{sen} \theta \cdot g + g^2} \quad (5)$$

em que:

V_r = velocidade resultante (m s^{-1});

θ = ângulo formado entre a trajetória da gota e o plano horizontal;

g = aceleração da gravidade (m s^{-2}).

O estudo do diâmetro de gotas produzido por um aspersor é de suma importância, pois, sistemas que produzem gotas grandes podem provocar erosão nos solos. Por outro lado, gotas muito pequenas poderão ser arrastadas por deriva.

Rocha (1998), estudando a distribuição de gotas apresentada por um sistema de irrigação autopropelido, concluiu que o diâmetro de gotas e a energia cinética aumentam à medida que se reduz a pressão de serviço do aspersor e à medida que aumenta a distância do aspersor para o fim do raio de alcance.

Vilela (1995), trabalhando com aspersor de impacto, verificou diminuição do número de gotas e aumento do tamanho das gotas do aspersor para a periferia molhada.

² Luiz Antônio Lima. Universidade Federal de Lavras (UFLA). Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola. Irrigação por Aspersão – DER -510, 1995. (notas de aula).

Existem vários métodos para a determinação da distribuição das gotas produzidas por um sistema de irrigação, mas, segundo Vilela (1995), o método mais prático, simples e utilizado é o da farinha, que consiste em expor, ao longo do raio de alcance do equipamento, recipientes contendo farinha de trigo. As gotas, ao caírem sobre a farinha, formam grânulos que, depois de secos, são comparados a uma curva de calibração para a determinação do diâmetro das gotas que o produziram.

Tarjuelo (2005) também cita o método da farinha para a determinação da distribuição de gotas por parte de um aspersor e comenta que existem outros métodos como, por exemplo, laser infravermelho. Mas, os altos custos e algumas limitações inviabilizam seu uso.

2.6 Determinação de vazão

Delmée (2003) comenta que existem vários métodos para medir a vazão em condutos forçados e que a mais antiga e a mais utilizada no mundo todo é a placa de orifício.

O mesmo autor, baseado no teorema e na equação de Bernoulli, apresenta a Equação 6 para cálculo da velocidade do fluxo em elementos deprimogênios.

$$V_1 = E \cdot \beta^2 \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{2}{\rho} \right) \cdot (P_1 - P_2) \right)} \quad (6)$$

em que:

V = velocidade de fluxo (m s^{-1});

$$E = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^4)}};$$

$$\beta = \frac{d}{D};$$

D = diâmetro interno do tubo (m);

d = diâmetro do orifício da placa.

P₁ = pressão a montante da placa de orifício (kgf m⁻²);

P₂ = pressão a jusante da placa de orifício (kgf m⁻²);

ρ = massa específica do fluido (kg m⁻³).

Ainda segundo Delmeé (2003), o teorema de Bernoulli não pode ser aplicado para escoamentos reais, pois, em escoamento real, a velocidade não é igual em todos os pontos e as linhas fluidas não acompanham o formato geométrico da tubulação. Para o uso deste teorema, é necessária a inclusão de um coeficiente de descarga para a placa de orifício, que correlaciona a vazão real com a vazão teórica. O valor deste coeficiente é função do regime de fluxo nas tubulações, variando de 0 a 1.

Para o cálculo do número de Reynolds e a vazão, Delmeé (2003) apresenta a Equação 7 e a Equação 8.

$$R_D = \frac{1,273 \cdot Q_m}{D \cdot \mu_p} \quad (7)$$

$$Q_m = 1,1107 \cdot C \cdot E \cdot \beta^2 \cdot D^2 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{(\Delta p \cdot \rho)} \quad (8)$$

em que:

Q_m = vazão mássica (kg s⁻¹);

D = diâmetro da tubulação (m);

μ_p = viscosidade do fluido (Pa s⁻¹);

C = coeficiente de descarga;

ε = fator de expansão isentrópica;

ρ = massa específica do fluido (kg m³).

Sampaio (1999), avaliando a influência da concentração de sólidos totais contidos em água residuária de suinocultura na perda de carga em tubulações, fez uso de uma placa de orifício para determinação de vazões. A Equação 9 foi apresentada para a determinação da vazão para concentração de até 8,56%.

$$Q = 1,1813 \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (9)$$

em que:

Q = vazão do fluido ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$);

Δp = diferencial de pressão (cm de água residuária).

2.7 Perda de carga distribuída em tubulações

A tendência de um fluido em escoar tem sido assunto desafiante e pesquisado durante muito tempo. O primeiro cientista a pesquisar o assunto foi o famoso filósofo inglês Isaac Newton, revelando que o fluxo é diretamente proporcional à força aplicada, definindo, assim, uma classe de líquidos, conhecida como fluidos newtonianos.

Os fluidos obedecem a uma equação de proporcionalidade em relação à tensão de cisalhamento aplicada e à velocidade de deformação resultante, que quer dizer viscosidade dinâmica “ μ ” constante. Quando isso acontece, o fluido é denominado newtoniano. A água é o exemplo mais típico dessa classe.

Os líquidos podem ser classificados, quanto à sua resistência ao escoamento (viscosidade), em duas grandes classes: os fluidos newtonianos e os não newtonianos. Nos fluidos newtonianos, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação constitui uma linha reta, passando pela origem Figura 1.

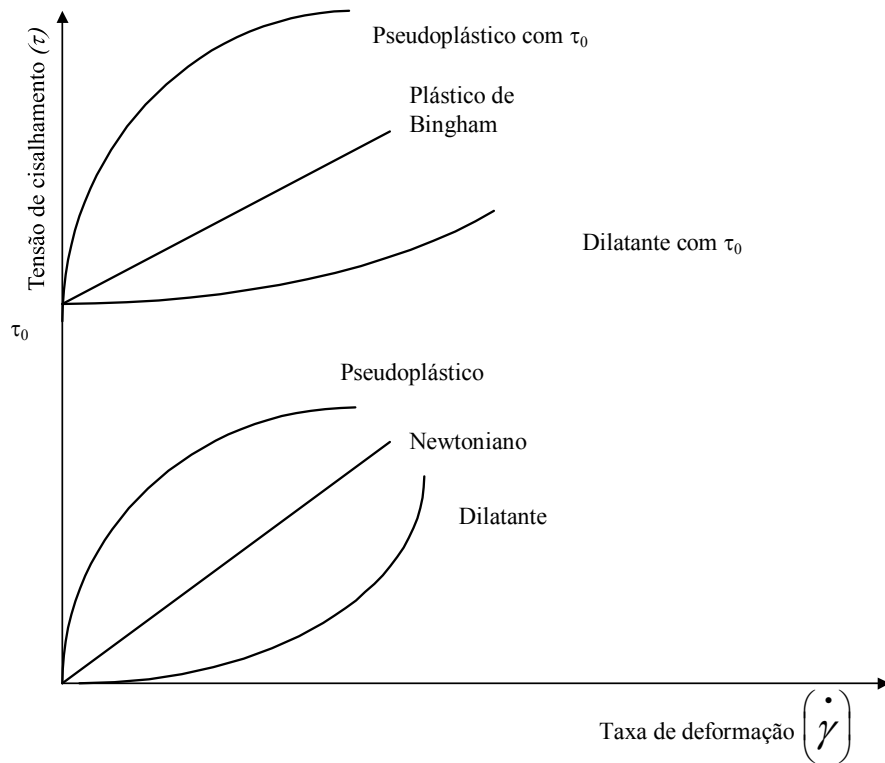


FIGURA 1. Diagrama reológico.

Os fluidos da classe dos não newtonianos, em que a relação entre a tensão de cisalhamento não é linear, são subdivididos em:

- . pseudoplásticos: a curva do fluido é côncava para o eixo da taxa de deformação; para isso, $\tau_0=0$ e $n<1$;

- . dilatantes: a curva do fluido é convexa para o eixo da taxa de deformação; para isso, $\tau_0=0$ e $n>1$. São fluidos que aumentam de volume quando ocorre o escoamento, sendo uma característica de líquidos que contém uma alta concentração de partículas sólidas e insolúveis em suspensão, da ordem de 40% a 70%, como o caso de areia e amido;

. plásticos: a curva do fluido pode ser côncava, convexa e retilínea (plástico de Bingham), no entanto, não passa pela origem. Nesse tipo de fluido, $\tau_0 \neq 0$. Na prática, isso significa que o fluido não escoar logo que a força é aplicada, sendo necessária uma força de certa magnitude para que comece a escoar.

Esta combinação de fluido não newtoniano com sua dependência do tempo produz um sistema altamente complexo, em que é praticamente impossível caracterizá-lo matematicamente com os métodos e instrumentos disponíveis (Hughes e Brighthon, 1974).

Na literatura são apresentadas várias definições de viscosidade, como:

. viscosidade dinâmica ou absoluta (μ) – representa a fricção interna do líquido newtoniano, isto é, sua tendência de resistir ao escoamento. Neste caso, $n = 1$; $\tau_0 = 0$ e $K = \mu$. Sua unidade é o poise, que possui as dimensões: $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$;

. viscosidade cinemática (ν) – representa a relação entre a viscosidade absoluta (μ) e a massa específica (ρ) do fluido. Sua unidade é o stokes, que tem as dimensões: m^2s^{-1} ;

. viscosidade relativa (μ_{rel}) – é a razão entre as viscosidades dinâmicas da solução e do solvente puro, sendo um parâmetro adimensional;

. viscosidade aparente (η) – é a viscosidade de um fluido não newtoniano, expresso como se fosse um fluido newtoniano. A maioria dos fluidos não newtonianos possui viscosidades aparentes relativamente elevadas, quando comparadas com a viscosidade da água (Fox e McDonald, 1985).

. viscosidade efetiva (μ_e) – representa a viscosidade real de um fluido não newtoniano, utilizada em cálculos de perda de carga e dimensionamento de bombas para fluido não newtoniano, sendo expressa nas dimensões: $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$.

Essas viscosidades são determinadas por intermédio de aparelhos denominados viscosímetros, que são classificados como: capilar, orifício, rotacional, cônico e gravitacional.

A viscosidade de um fluido é afetada pelos seguintes fatores (Chen e Hashimoto, 1976):

- . temperatura – existe, normalmente, uma relação inversa entre a viscosidade e a temperatura dos fluidos. O efeito da temperatura pode ser negligenciável para água residuária de suinocultura (ARS), nas condições de campo, em que a temperatura encontra-se entre 10°C e 30°C. Esta faixa de temperatura afeta apenas o solvente (água), não afetando o conjunto de partículas em suspensão, que é fator determinante do fluido pseudoplástico. Quando ocorrem altas temperaturas, a estrutura das partículas em suspensão é afetada, modificando as propriedades do fluido (Herum et al., 1966; Chen e Hashimoto, 1976 e Kumar et al., 1972);

- . concentração do soluto – apresenta uma relação não linear com a viscosidade, podendo diminuir ou aumentar, dependendo do tipo de soluto;

- . pressão – a viscosidade da maioria dos fluidos é essencialmente constante na faixa de pressão de 0 a 100 atm. Assim, este efeito pode ser perfeitamente ignorado, pois a variação acima desta faixa é muito pequena;

- . matéria em suspensão – a viscosidade aumenta levemente em baixas concentrações, no entanto, altas concentrações podem ocasionar um aumento substancial, devido ao atrito entre as partículas. Em geral, altas concentrações de matéria em suspensão resultam em fluidos não newtonianos, pseudoplásticos ou dilatantes;

- . pH – o exato mecanismo que determina a influência do pH sobre a viscosidade é assunto de debate, segundo Chen e Hashimoto (1976). Sabe-se que o seu efeito é maior quando o escoamento se processa em regime laminar.

De acordo com Chen e Hashimoto (1976), Einstein, em 1905, foi o primeiro a propor que a tensão de cisalhamento é proporcional à taxa de deformação e também à fração de volume de sólidos. Este parâmetro é definido pela relação entre os pesos inicial e final da mistura, representando uma relação

direta com sólidos totais. A partir desta teoria surgiu a Equação 10, que define esta relação:

$$\tau = b_1 \Phi^{b_2} \dot{\gamma}^{(b_3 + b_4 \ln \Phi)} \quad (10)$$

em que:

Φ = fração de volume de sólidos totais (adimensional).

Nota-se que as constantes reológicas K e n podem ser determinadas a partir da fração de volume de sólidos, quando a Equação 11 é comparada com a Equação 1, ou seja, $K = b_1 \Phi^{b_2}$ e $n = b_3 + b_4 \ln \Phi$.

A partir dessa teoria, Chen e Hashimoto (1976) desenvolveram um trabalho que apresenta essa Equação 10 ajustada para água residuária de bovinocultura (ARB), água residuária de suinocultura (ARS) e água residuária de avicultura (ARA). Assim, fazendo-se uso das Equações 11 ajustadas para ARS, é possível estimar os valores de K e n.

$$\tau = 0,533 \times 10^{-6} \Phi^{3,51} \dot{\gamma}^{(1,108 - 0,1960 \ln \Phi)} \quad (11)$$

em que:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (s^{-1});

Φ = fração de volume de sólidos totais (adimensional).

A Equação 11 foi determinada para a faixa de 4,4% a 10% de sólidos totais (ST), e 30% a 54% de Φ .

As características reológicas de um fluido influenciam diretamente na perda de carga que ocorre durante o escoamento de qualquer fluido real. A determinação dessa perda de energia é de fundamental importância no dimensionamento de sistemas pressurizados.

O balanço de energia para um escoamento incompressível em regime permanente é comumente expresso pela Equação 12. Os índices 1 e 2 representam os pontos de referência em um sistema de bombeamento, em que os parâmetros principais a serem dimensionados são os diâmetros da tubulação e as potências da bomba e do motor.

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{\alpha g} + Hm = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{\alpha g} + h_t \quad (12)$$

em que:

Z = carga de posição (m);

p/γ = carga de pressão (m);

$V^2/\alpha g$ = carga cinética (m);

Hm = trabalho fornecido pela bomba (m);

h_t = perda de carga total na tubulação (m).

A energia de posição e a de pressão são termos que independem das propriedades do fluido bombeado; assim, não é problema quando se tratam de fluidos não newtonianos. O maior problema na estimativa da energia cinética é o valor de α . No escoamento turbulento, $\alpha=2$.

A perda de carga total (h_t) envolve tanto a perda contínua ou distribuída, devido ao atrito interno e à fricção entre o fluido e as paredes, quanto à perda localizada que ocorre em válvulas, registros, curvas, etc. Logo, a perda de carga

total em uma tubulação que conduz qualquer tipo de fluido é calculada por meio da Equação 13.

$$h_t = h_f + h_a \quad (13)$$

em que:

h_f = perda de carga contínua ou distribuída (m);

h_a = perda de carga localizada (m).

Considerando o balanço de energia em uma tubulação horizontal, de seção transversal constante, com escoamento plenamente estabelecido, a Equação 12 resume-se a Equação 14.

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{\Delta p}{\gamma} = h_f \quad (14)$$

em que:

p_1 = pressão no início da tubulação (m);

p_2 = pressão no final da tubulação (m);

γ = peso específico do fluido circulante (kg m^{-3});

Δp = diferença de pressão entre o início e o final da tubulação (m).

Existem diversas fórmulas que estimam a perda de carga distribuída em condutos forçados com seção circular e área constante. De acordo com Duffy (1976), os métodos de avaliação desta perda de carga são agrupados em três categorias: correlações gráficas, equações empíricas e equações que estimam o

fator de atrito. Atualmente, as duas últimas são as mais utilizadas e de maior precisão, devido à facilidade de acesso ao computador.

Dentre as equações que utilizam o fator de fricção, a mais usada é a Equação 15, conhecida com Equação Universal:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = 8f \frac{L Q^2}{D^5 \pi^2 g} \quad (15)$$

em que:

f = fator de atrito (adimensional);

L = comprimento da tubulação (m);

D = diâmetro interno da tubulação (m);

V = velocidade média do fluido (m s^{-1});

g = aceleração da gravidade (m s^{-2});

Q = vazão média ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

Existem várias equações que permitem estimar o fator de atrito em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa das paredes da tubulação, para fluidos newtonianos. Essas equações somente podem ser aplicadas para o regime de escoamento em que foram encontradas, que é definido pelo número de Reynolds (Equação 16).

$$\text{Re}_y = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (16)$$

em que:

Re_y = número de Reynolds (adimensional);

ρ = massa específica do fluido (kg m^{-3});

μ = viscosidade absoluta ($\text{kg m}^{-2} \text{s}$).

Em função do valor do número de Reynolds, o regime de fluxo é qualificado em regime laminar, turbulento ou numa forma de transição. Para o cálculo do fator de atrito (f), existem várias equações, entre elas a Equação 17.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left[\frac{e}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{\text{Re} \cdot y \cdot \sqrt{f}} \right] \quad (17)$$

em que:

e = rugosidade absoluta do tubo (m).

Sampaio (1999), estudando a influência da concentração de sólidos totais contidos em água residuária de suinocultura, concluiu que a perda de carga aumentou com o aumento da concentração de sólidos e ainda propôs vários modelos para o cálculo da perda de carga em tubulações comerciais. O mesmo autor apresentou um modelo intitulado Hazen-Williams modificado, Equação 18, que correlaciona perda de carga com a vazão, o diâmetro interno do tubo, o coeficiente de rugosidade e a concentração de sólidos totais presentes no fluido, que apresenta boa precisão e facilidade de manuseio.

$$J = \frac{0,540257 \cdot ST^{0,173} \cdot Q^{1,789}}{C^{1,1724} \cdot D^{4,589}} \quad (18)$$

em que:

J = perda de carga contínua (m m⁻¹);

ST = concentração de sólidos totais (%);

Q = vazão (m³ s⁻¹);

C = coeficiente de atrito (adimensional);

D = diâmetro interno do tubo (m).

Segundo Azevedo Netto et al. (1998), a escolha do coeficiente de atrito para o uso do modelo de Hazen-Williams é de fundamental importância, pois a negligência ou a fixação de um valor médio reduzem muito a precisão da equação. Comentam ainda estes autores que o valor do coeficiente é uma função do tempo, podendo chegar a 80, para tubos metálicos com 20 anos de vida útil usados no bombeamento de água sem sólidos.

Kamand (1988), estudando os diferentes coeficientes de atrito usados em equações para cálculo da perda de carga em tubos, propõe relações matemáticas e nomogramas que relacionam coeficiente para diferentes equações. A Equação 19 correlaciona o coeficiente da equação de Darcy-Weisbach (D-W) e a equação de Hazen-Williams (H-W).

$$f_{HW} = 10,1079 \cdot g \cdot (k_1 \cdot C)^{-1,852} \cdot D^{-0,167} \cdot V^{-1,167} \quad (19)$$

em que:

f_{HW} = coeficiente de atrito da equação de Darcy-Weibach calculada a partir da equação de Hazen-Williams;

g = aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$);

C = coeficiente da equação de Hazen-Williams;

D = diâmetro do tubo (m);

V = velocidade do fluxo ($m \cdot s^{-1}$).

O sistema de irrigação autopropelido é um equipamento exigente em pressão, pois a turbina é o propulsor do carroaspersor; portanto, é de se esperar um consumo de pressão para esta operação. Rocha (2000), avaliando equipamento similar, constatou necessidades de acréscimos na pressão na entrada do carretel de até 77% da pressão do aspersor, em função da perda de carga provocada pela turbina.

2.8 Potência absorvida da rede elétrica pelo sistema

A Equação 20 é utilizada para o cálculo da potência exigida por um motor de uma rede elétrica trifásica, baseando na tensão, corrente e no fator de potência apresentado pelo motor, sendo este função da carga aplicada ao motor, da corrente e da tensão, e ainda influenciado pela rede elétrica.

$$Pot_{rede} = \frac{\gamma.I.V\sqrt{3}.FP}{736} \quad (20)$$

em que:

Pot_{rede} = potência exigida da rede pelo sistema (c.v.);

γ = peso específico do fluido (kgf m⁻³);

I = corrente de operação do motor (A);

V = tensão de operação do motor (V);

FP = fator de potência (decimal).

O fator de potência é função do tipo de motor e da carga à qual o motor está submetido.

A potência exigida pela bomba do motor é função da vazão, da altura manométrica, do rendimento da bomba e do peso específico do líquido bombeado, podendo ser calculada pela Equação 21.

$$Pot_{eixo} = \frac{\gamma.H_{man}.Q}{3600.75.\eta_B} \quad (21)$$

em que:

Pot_{eixo} = potência exigida no eixo da bomba (c.v.);

γ = peso específico do fluido (kgf m^{-3});

H_{man} = altura manométrica (mca);

Q = vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$);

η_B = rendimento total da bomba (decimal).

Estudos envolvendo o bombeamento de água residuária de suinocultura, realizados por Soccol (1996), permitiram ao autor concluir que, devido à complexidade do fluido e ao fato de a bomba apresentar rendimentos inferiores em relação a sua operação com água, de forma prática, deve-se adotar um acréscimo de 20% no valor da potência absorvida pelo sistema.

Teixeira (1973), analisando o efeito da concentração de areia em água, nas curvas características de bombas centrífugas, concluiu que, para as menores concentrações, a exigência de potência por parte da bomba foi menor em relação ao bombeamento de água sem sólidos e que, para maiores concentrações, maiores foram as exigências de potências para uma mesma vazão e altura manométrica. O autor ainda explica que, pela dificuldade em avaliar os efeitos destas concentrações no rendimento da bomba, que isso seja atribuído à alterações da viscosidade do fluido, facilitando ou dificultando o escoamento.

Azevedo Netto et al. (1998) afirmam que a modificação do peso específico não tem influência sobre a vazão e a pressão de uma bomba centrífuga, se expressa em metros do fluido movimentado. Mas, a potência modifica-se proporcionalmente ao peso específico e que mais importantes são as propriedades de pressão de vapor e viscosidade. A pressão de vapor influencia as condições de cavitação e a viscosidade modifica a vazão, a pressão e o rendimento da bomba.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a avaliação de um sistema de irrigação autopropelido, aplicando-se água residuária de suinocultura, foram conduzidos ensaios, numa área experimental do Centro Federal de Educação Tecnológica situado em Uberaba (CEFET), na região do Triângulo Mineiro. Sua localização geográfica é definida pelas coordenadas 19°39'33" de latitude Sul e 47°57'33" de longitude Oeste, com altitude média de 805 m.

O clima da região é do grupo Aw, segundo Köppen, com precipitações médias anuais de 1.560 mm e temperatura média anual próxima de 22°C.

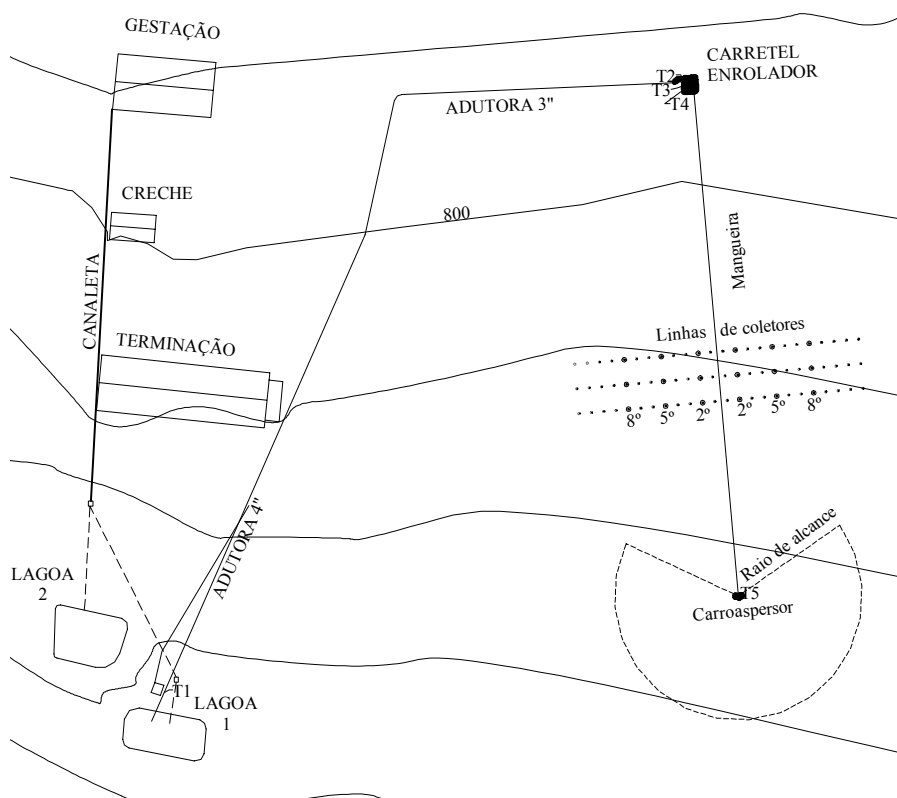
3.1 Caracterização da área experimental

Os ensaios foram conduzidos, no período de maio a novembro de 2006, em uma área próxima ao Setor de Suinocultura do CEFET-Uberaba. A área possui uma inclinação de 1% no sentido de caminhamento do carroaspensor (Figura 2), onde foram feitas uma aração profunda e uma gradagem de nivelamento para facilitar a instalação dos coletores e o trânsito do carroaspensor. No carreador central por onde transita o carroaspensor foi feita uma sistematização com uma lâmina montada na parte traseira de um trator, com o objetivo de diminuir o atrito entre a mangueira e o solo.

3.2 Caracterização do sistema de captação dos dejetos de suínos

O modelo de criação de suínos do CEFET-Uberaba é de ciclo completo, com um rebanho estabilizado de 40 matrizes, que produzem um volume médio diário de dejetos de 6 m³. O dejetos é coletado de todas as instalações que

compõem o sistema de criação e conduzido até as lagoas de estabilização 1 e 2, por meio de canaletas e tubos de PVC 150 mm (Figura 1).



T1, T2, T3, T4, e T5 = Tomadas de pressão.

FIGURA 2. Representação da área experimental. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

3.3 Sistema de tratamento dos dejetos

O método de tratamento utilizado para a estabilização da matéria orgânica é o de lagoas de estabilização do tipo facultativa, constituído por duas unidades com volume individual de aproximadamente 500 m³. O tempo de

detenção hidráulica para a sua estabilização foi de 30 dias, durante os quais o líquido era agitado a cada dois dias, por meio de um sistema de bombeamento e injeção do mesmo em diferentes pontos da lagoa, buscando-se acelerar o processo por meio de homogeneização (Figura 3).



FIGURA 3. Sistema de tratamento do dejetos de suínos existente na instituição. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

3.4 Caracterização da água residuária

Para a caracterização do fluido aplicado pelo sistema de irrigação, foram avaliados o peso específico e a concentração de sólidos totais, fixos e voláteis, por meio de amostras coletadas ao longo do raio de alcance do aspersor. Foram colocados seis coletores em cada linha de coleta, considerando-se as amostras do

2º, 5º e 8º coletores, distanciados de 1,5, 13,5 e 22,5 m, respectivamente, para cada lado do centro do carreador. Após a mensuração do volume em cada ponto, estas amostras foram colocadas em recipientes devidamente identificados e depositadas as demais amostras de mesma posição, obtendo-se uma amostragem composta.

Para a determinação da quantidade de sólidos e suas frações em cada amostra, seguiu-se a metodologia proposta pela NBR 10664, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1989).

O peso específico do fluido de cada tratamento experimental foi determinado por meio da pesagem de amostras de 100 ml, colocadas em um balão volumétrico. Estas amostras foram compostas de todas as outras utilizadas na determinação dos sólidos. Foi determinado um valor médio de três repetições para cada concentração.

3.5 Caracterização do sistema de bombeamento

O sistema de bombeamento foi instalado sobre uma balsa, buscando-se diminuir a altura de sucção. O conjunto motobomba utilizado foi da marca Schneider, modelo MSA-22R 1¼" x 1", sendo acionado por um motor elétrico trifásico de 15 c.v., tendo como dispositivo de acionamento uma chave de partida estrela triângulo do tipo alavanca. A tubulação de sucção era constituída por uma válvula de pé com crivo, curva 90° em aço 3" e uma redução excêntrica 3" x 1¼" na entrada da bomba. A ligação de pressão até a saída da lagoa foi feita em mangote flexível 3", contendo, ainda, uma curva de 90° com ampliação 1" x 3", registro de gaveta 3" e uma tomada de pressão do tipo engate rápido para a determinação da pressão de serviço de bombeamento. A adutora foi constituída de 21 barras de tubo de aço zincado com diâmetro nominal 108 mm, uma redução em aço zincado 108 mm para 89 mm e 17 barras de tubos 89 mm

de diâmetro nominal, uma curva de derivação ligada ao carretel enrolador e um tampão final. A tubulação empregada na adutora tinha tempo de uso superior a 15 anos, portanto, com rugosidade interna possivelmente alterada.

3.6 Caracterização e funcionamento do equipamento de irrigação

O equipamento de irrigação utilizado nos ensaios de avaliações foi do tipo autopropelido, da marca Metal Lavras e modelo Hidro-Roll 63/150 série mini, conforme mostrado na Figura 4, com as seguintes características:

- comprimento da mangueira de 150 m;
- diâmetro da mangueira, 63 mm;
- espessura da parede da mangueira, 4,7 mm;
- redutor de velocidade acionado por engrenagens com duas velocidades;
- acionamento do carretel enrolador por pinhão e cremalheira;
- sistema de regulagem da velocidade de recolhimento da mangueira eletrônico;
- fim de curso, e
- carroaspersor, no qual foi instalado o aspersor da marca Plona, modelo RL 250.



FIGURA 4. Sistema de irrigação autopropelido usado nos ensaios. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

A velocidade de recolhimento da mangueira foi controlada por um equipamento eletrônico para monitorar a velocidade programada por meio de um rolo medidor (rolete), que se movimentava quando a mangueira estava sendo enrolada. O rolete possuía um sensor que transmite um sinal à central eletrônica, promovendo, assim, o acionamento de um micromotor acoplado a uma válvula “by-pass”, fechando ou abrindo a passagem da água pela turbina, mantendo, assim, a velocidade de recolhimento constante. A velocidade pode ser ajustada na taxa de 15 a 100 m h⁻¹ (Figura 5). A velocidade de ensaio foi programada e mantida em 40 m h⁻¹, em todos os tratamentos.

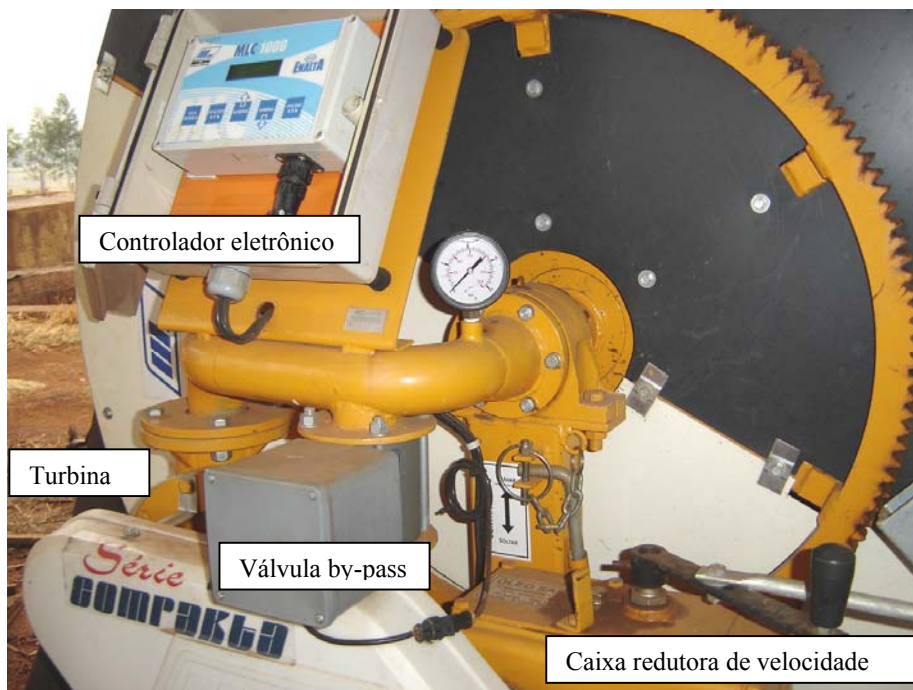


FIGURA 5. Sistema de controle de velocidade de recolhimento da mangueira. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Sobre o carroaspersor foi instalado um aspersor tipo canhão hidráulico, marca Plona modelo RL250 (Figura 6), com ângulo de inclinação do jato principal de 24° e o bocal principal cônico de 14 mm, com bocal auxiliar vedado. A pressão utilizada em todos os ensaios foi de 30 mca, medida no tubo de subida do aspersor. O movimento de rotação do aspersor se dava por meio de um braço oscilante e um balancim (rotação de uma volta por minuto). O ângulo no qual o aspersor aplicou água foi de 240° , para todos os ensaios.



FIGURA 6. Aspersor da marca Plona e modelo RL-250. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

A ligação entre o carroaspersor e o sistema de recolhimento foi feita por uma mangueira de polietileno de média densidade, diâmetro nominal de 63 mm, pressão nominal de 800 kPa, espessura da parede de 4,7 mm e comprimento de 150 m.

O sistema propulsor de recolhimento do carroaspersor foi dotado de uma turbina acionada pelo próprio fluido de irrigação. A água residuária, ao passar pela turbina, acionava uma polia que estava ligada, por meio de correias, a uma caixa redutora de velocidade. Esta caixa, por meio de engrenagens, promoveu o acionamento do carretel, responsável pelo recolhimento da mangueira, e o conseqüente movimento do carroaspersor. Quando este se aproximava do carretel enrolador, um equipamento denominado fim de curso promovia a parada do mesmo. Esta parada era obtida quando uma haste metálica fixada à

mangueira deslocava uma alavanca e colocava a caixa redutora na posição desengrenada, a fim de não transmitir movimento ao carretel enrolador. A caixa redutora de velocidade possuía duas taxas de redução, das quais uma permitia a velocidade de recolhimento da mangueira de 0 a 50 m h⁻¹ e a outra que permitia velocidades de 50 a 200 m h⁻¹.

3.7 Delineamento experimental e análises estatísticas

Os ensaios foram delineados experimentalmente, em blocos casualizados (DBC). O sistema de bombeamento foi instalado sobre uma balsa flutuante dentro da lagoa, sendo os tratamentos considerados nas profundidades de captação na lagoa. A concentração de sólidos totais existente em cada camada foi considerada como tratamento. Foram realizadas três repetições para cada tratamento, perfazendo um total de 36 avaliações. Deste total, três ensaios com água sem sólidos foram realizados em momentos distintos.

Na Figura 7 está representado o perfil de sólidos totais dentro da lagoa, sendo as concentrações consideradas como os tratamentos experimentais.

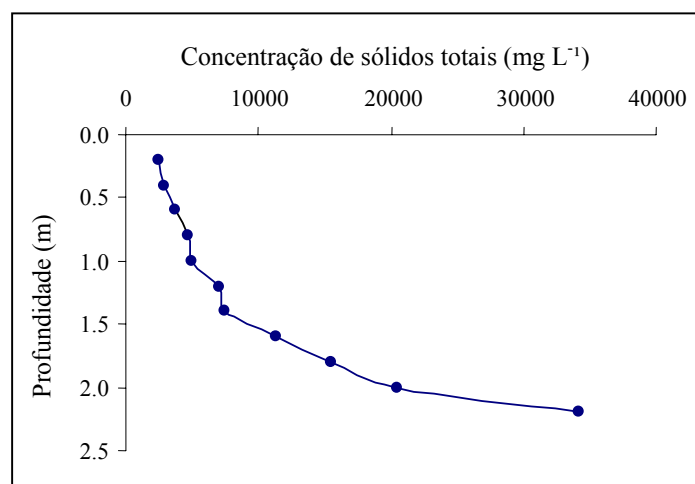


FIGURA 7. Perfil de sólidos totais da lagoa. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

O aspersor foi avaliado com o bocal principal de 14 mm (bocal auxiliar vedado).

Os tratamentos experimentais foram realizados em função das concentrações de sólidos totais contidos em cada camada retirada, durante o ensaio, da lagoa de estabilização.

Todas as características foram submetidas à análise de variância, sendo os efeitos dos tratamentos estudados por meio de análise de regressão. O programa estatístico utilizado para as análises foi o “software” Sisvar “for Windows”, versão 4.3 (Ferreira, 1999). Para a elaboração final dos gráficos, foi utilizado o “software” Sigmaplot 2000.

Os fatores de estudo foram as perdas de carga na tubulação adutora, turbina e mangueira, o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), o raio de alcance do aspersor, a uniformidade de distribuição de sólidos totais ao longo do raio de alcance do aspersor, o rendimento da bomba e a exigência de potência da rede elétrica pelo sistema.

3.8 Procedimentos de campo

Os ensaios de campo foram conduzidos conforme estabelecido pelas normas de qualidade internacional ISO 8224/1(2003), a qual estabelece os procedimentos para avaliação do equipamento de irrigação e a ISO 7749/2(1990), que descrevem a metodologia de avaliação de distribuição de água por parte do sistema de irrigação autopropelido.

Foram instaladas 3 linhas de coletores espaçadas de 6 m uma da outra, contendo 24 cada uma, sendo 12 para cada lado do carreador e espaçadas entre si de 3 m. A primeira linha foi instalada a 70 m do carretel enrolador e perpendicular ao eixo central do carreador.

Os coletores utilizados foram da marca Fabrimar, com 80 mm de diâmetro e instalados em haste metálica a uma altura de 0,50 m acima do solo.

Durante cada ensaio foram feitas quatro observações dos parâmetros de avaliação do equipamento: pressão nas cinco tomadas de pressão, velocidade do vento, tensão e corrente de funcionamento do motor. A primeira observação foi feita quando a primeira linha de coletores começava a receber fluido; a segunda quando a última linha começava a receber fluido; a terceira quando a primeira linha deixava de receber fluido e a última quando a terceira linha deixava de receber fluido.

Para as avaliações das pressões foram instaladas tomadas de pressão em pontos estratégicos do equipamento, sendo uma instalada no início da adutora (T1), a segunda na entrada da turbina do equipamento (T2), a terceira após a turbina (T3), a quarta após a conexão da turbina com o “by-pass”(T4) e a quinta no tubo de subida no qual se encontrava o aspersor (T5), conforme pode visto na Figura 2.

Para a determinação de tensão e corrente foi utilizado um alicate amperímetro digital, sendo feitas leituras de corrente em cada fase e a tensão entre as três fases.

Os dados climáticos foram obtidos em uma estação meteorológica instalada próximo à área de ensaio, sendo registradas as temperaturas máximas e mínimas diárias e a velocidade do vento monitorada por um anemômetro digital instalado a 2 m de altura ao lado da área experimental.

3.8.1 Localização dos pontos de amostragem do fluido

Para a caracterização física do fluido, foram instalados coletores conforme Figura 8, na qual são mostradas as linhas de coletores e os coletores utilizados para amostragem para a caracterização física do fluido.

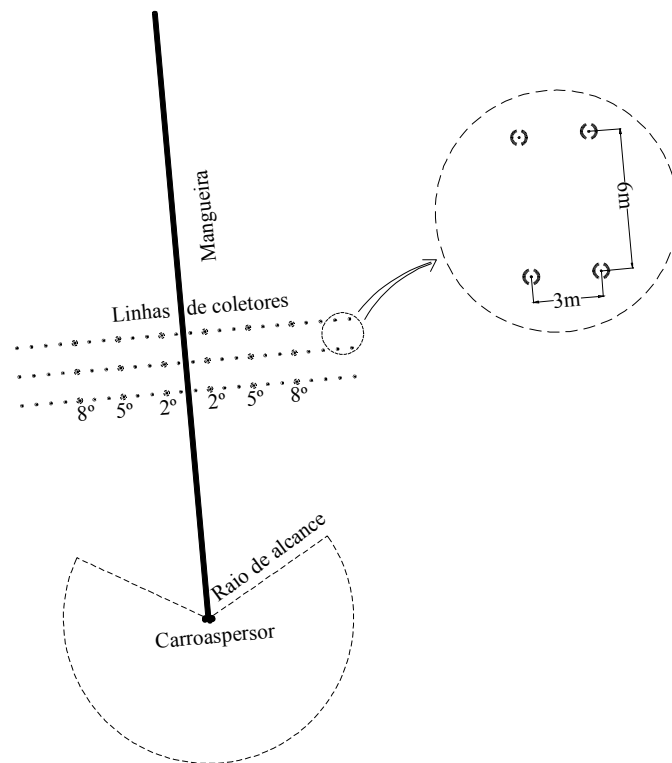


FIGURA 8. Distribuição dos coletores no campo e pontos de coleta para a determinação de sólidos totais e peso específico do fluido. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Para a caracterização física do fluido foi avaliado o peso específico por meio do método do balão volumétrico e a viscosidade cinemática calculada pela Equação 15, 16 e 17, tendo como base os dados de perda de carga avaliada na mangueira e a rugosidade relativa calculada para o tratamento sem resíduo.

3.8.2 Perda de carga na tubulação adutora

Para as avaliações da perda de carga na tubulação adutora, foram utilizadas tomadas de pressão metálica do tipo engate rápido, instaladas no início e no fim da tubulação utilizando um manômetro tipo Bourdon (glicerina, previamente calibrado e sempre escorvado com água sem sólidos para evitar entupimentos).

As leituras de pressão foram feitas após o registro de gaveta instalado no início da adutora e na entrada do carretel enrolador nas tomadas T1 e T2, conforme pode ser visto na Figura 2. Com base nos dados médios das leituras de pressão em cada tomada, os valores das cotas das tomadas de pressão e com o peso específico de cada tratamento e, ainda, utilizando-se a Equação 12, avaliou-se a perda ocorrida neste trecho de tubulação.

3.8.3 Perda de carga na turbina

Para as avaliações de perda de carga provocada pela turbina, foram feitas leituras nas tomadas de pressão T2 e T3, mostradas na Figura 1. A tomada T2 estava localizada na entrada da turbina e a tomada T3 após a mesma. Com base nos dados médios das leituras de pressão em cada tomada, nos valores das cotas das tomadas de pressão e no peso específico de cada tratamento, e utilizando-se a Equação 12, avaliou-se a perda ocorrida neste dispositivo.

3.8.4 Perda de carga na mangueira

As avaliações de perda de carga na mangueira foram feitas com base nas leituras de pressões entre as tomadas T4 e T5, apresentadas na Figura 2. Com base nos dados médios das leituras de pressão em cada tomada, nos valores das

cotas das tomadas de pressão e no peso específico de cada tratamento, e utilizando-se a Equação 12, avaliou-se a perda ocorrida neste trecho de tubulação.

3.8.5 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

Durante todos os ensaios, a velocidade do vento foi monitorada por um anemômetro digital instalado próximo da área a uma altura de 2 m. Todos os ensaios foram realizados com velocidades de vento inferiores a 2 m s^{-1} .

Para a determinação dos CUC, foi utilizado o aplicativo Simulasoft, desenvolvido por Prado (2004), em que foram simulados os espaçamentos de 30 m, 36 m, 42 m, 48 m e 54 m entre as faixas de irrigação, por meio da Equação 1.

3.8.6 Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor

Durante a determinação das lâminas coletadas em cada ensaio para o cálculo do coeficiente de uniformidade de Christiansen, os volumes dos coletores 2° , 5° e 8° , de cada lado do carreador central (Figura 8), foram armazenados em recipientes devidamente identificados, para a determinação da concentração de sólidos totais, fixos e voláteis em cada amostra. Em seguida, fez-se o cálculo médio do peso específico do fluido para cada tratamento.

Para a determinação da concentração de sólidos e suas frações, foi utilizada a metodologia proposta pela NBR 10664, da ABNT (1989).

3.8.7 Determinação do alcance do aspersor na faixa molhada

O alcance do aspersor, em cada tratamento, foi obtido após as simulações de espaçamento entre faixas de irrigação no aplicativo Simulasoft.

3.8.8 Potência exigida da rede elétrica pelo sistema

Para a determinação da potência exigida da rede pelo sistema de bombeamento, foram feitas leituras da tensão, em relação às três fases de energia e da corrente elétrica de cada fase, por meio de um multímetro digital. Com base nos dados da corrente média durante cada ensaio e com o uso da Equação 22, calculava-se a carga a qual o motor estava sendo submetido.

$$C = \frac{i}{i_n} . 100 \quad (22)$$

em que:

C = carga a qual o motor estava sendo submetido (%);

i = corrente média durante o ensaio (A), e

i_n = corrente nominal do motor (A).

Com base nos dados fornecidos pelo fabricante do motor, ajustou-se a Equação 23 para o cálculo do rendimento do motor com base na carga à qual o mesmo estava sendo submetido.

$$\eta_M = 0,06.C + 82,57 \quad (23)$$

em que:

η_M = rendimento do motor (%) e

C = carga a qual o motor estava sendo submetido (%).

Por meio da Equação 24 calculou-se o fator de potência do motor, baseado na carga do motor, sendo esta equação ajustada com base em dados fornecidos pelo fabricante do motor.

$$FP = 0,0024.C + 0,6567 \quad (24)$$

em que:

FP = fator de potência do motor (decimal);

C = carga a qual o motor estava sendo submetido (%).

Para o cálculo da potência exigida da rede elétrica, foi utilizada a Equação 20, com base na corrente e tensão média para cada tratamento e o fator de potência do motor calculado por meio da Equação 24.

Para cálculo do rendimento do conjunto motobomba, utilizou-se a Equação 25, que é uma relação entre a potência exigida da rede Equação 20 e potência útil no sistema Equação 26.

$$\eta_{MB} = \frac{P_u}{P_{rede}} \cdot 100 \quad (25)$$

em que:

η_{MB} = rendimento do conjunto motobomba (%);

P_u = potência útil (c.v.), e;

P_{rede} = potência exigida da rede elétrica (c.v.).

$$P_u = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man.}}{3600.75} \quad (26)$$

em que:

P_u = potência útil (c.v.);

Q = vazão do sistema de bombeamento, ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$);

$H_{man.}$ = altura manométrica (mca).

Conhecendo-se o rendimento do conjunto motobomba e o rendimento do motor é possível determinar o rendimento da bomba por meio da Equação 27.

$$\eta_B = \frac{\eta_{MB}}{\eta_M} \quad (27)$$

em que:

η_B = rendimento da bomba (%).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados climáticos

Os dados relativos às temperaturas registradas diariamente durante a condução do experimento são apresentados na Figura 9. Os valores médios de temperatura máxima, média e mínima observados foram de 29,4°C, 22,3°C e 15,2°C, respectivamente.

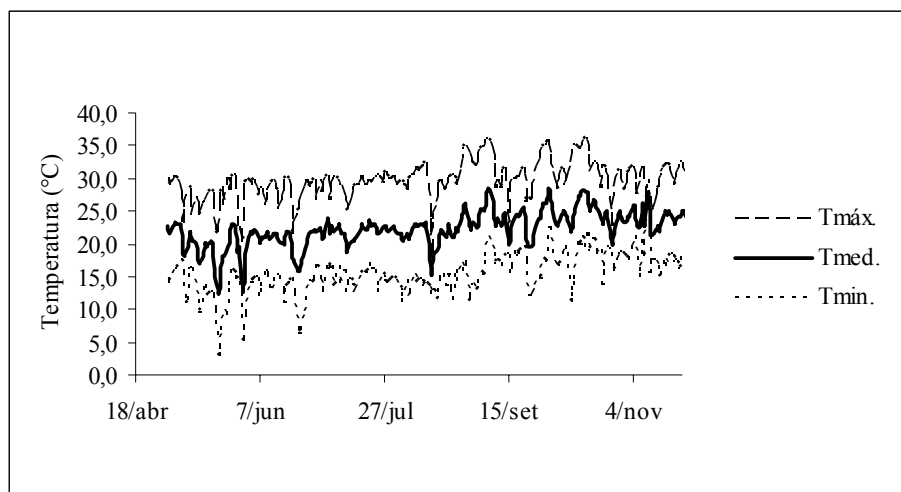


FIGURA 9. Representação gráfica das temperaturas diárias durante a condução do experimento. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

O efeito da temperatura pode ser negligenciável para ARS, nas condições de campo, em que a temperatura encontra-se entre 10°C e 30°C (Herum et al., 1966; Chen e Hashimoto, 1976 e Kumar et al., 1972).

4.2 Caracterização física do dejetos

Na Figura 10 estão representadas as concentrações de sólidos totais encontradas a cada profundidade da lagoa, as quais foram consideradas como os tratamentos experimentais. Pode-se observar um aumento da concentração com a profundidade, proporcionado pela decantação dos sólidos contidos da água residuária de suinocultura.

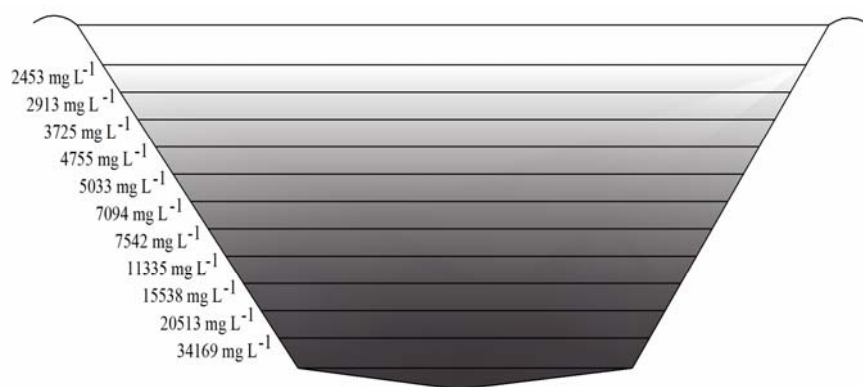


FIGURA 10. Representação esquemática dos tratamentos experimentais. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Para a caracterização física do dejetos foram utilizadas amostras coletadas para a determinação da distribuição do dejetos ao longo do raio de alcance do aspersor. Tomou-se uma amostra composta, para ambos os lados do carreador central, conforme visto na Figura 8.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores dos pesos específicos para cada tratamento, os quais foram determinados pelo método do balão volumétrico, que consiste em pesar uma amostra de volume conhecido.

TABELA 4. Concentração de sólidos (mg L^{-1}) e peso específico de cada tratamento experimental. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Concentração de sólidos (mg L^{-1})	γ (kgf m^{-3}) ¹
540 (água)	998,15
2453	999,30
2913	999,73
3725	999,89
4755	1000,28
5033	1000,44
7094	1001,21
7542	1001,42
11335	1002,77
15538	1004,34
20513	1006,27
34169	1012,37

¹ – Peso específico- método do balão volumétrico.

Ainda se pode observar, na Tabela 4, que há um aumento do peso específico com o aumento da concentração de sólidos da água residuária. Estes valores de peso específico também foram verificados por Oliveira (1993), que trabalhou com água residuária de suinocultura semelhante às condições apresentadas.

4.3 Calibração do medidor de vazão

Na Figura 12 está apresentada a curva de calibração da placa de orifício utilizada nas determinações de vazão para água, em que se correlacionou a vazão em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ com a leitura da diferença de pressão, em mm de água.

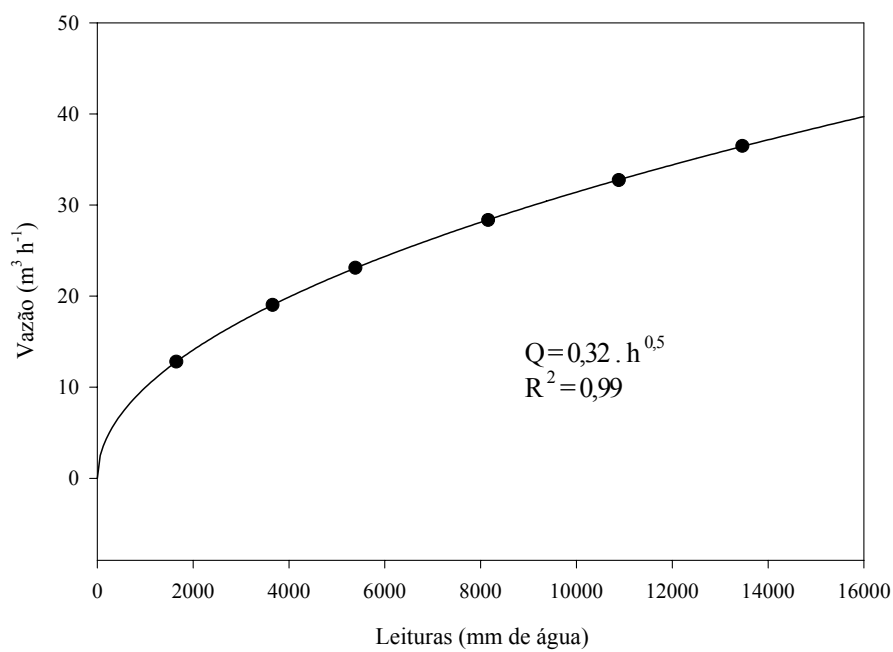


FIGURA 12. Curva de calibração do medidor de vazão. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

A calibração da placa de orifício foi realizada com água sem resíduo, comparando-se as vazões com um medidor de pás eletrônico. A utilização da placa com água residuária de suinocultura foi baseada no trabalho de Sampaio (1999).

Encontram-se na Tabela 5 os valores de vazão para cada tratamento. Pode-se observar que houve uma flutuação nos valores da vazão com o aumento da concentração de sólidos, tendo, para concentrações menores, havido um acréscimo nas vazões e, para as maiores concentrações, houve um decréscimo. Esta flutuação foi devido à redução da pressão de funcionamento do aspersor,

haja vista o aumento da perda de carga nas tubulações e na turbina, com o aumento da concentração de sólidos totais na água residuária.

TABELA 5. Vazão do aspersor em função da concentração de sólidos totais contidos em cada tratamento. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Concentração de sólidos (mg L ⁻¹)	Pressão (kgf cm ⁻²)	Vazão (m ³ h ⁻¹)
540 (água)	3,43	12,86
2453	3,21	12,94
2913	3,21	12,97
3725	3,21	12,92
4755	3,20	12,92
5033	3,20	12,92
7094	3,19	12,89
7542	3,21	12,92
11335	3,12	12,78
15538	3,11	12,79
20513	2,99	12,60
34169	2,92	12,50

4.4 Perda de carga média avaliada na adutora

Os dados da Tabela 6 mostram que a análise de variância revelou efeito significativo das concentrações de sólidos. A julgar pelo valor de CV% (1,74), a precisão experimental foi considerável.

TABELA 6. Resumo da análise de variância relativa aos dados de perda de carga na adutora (mcar^{**}). CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Fonte de variação	G. L.	Quadrado médio
Blocos	2	0,006258
Tratamentos	11	0,870910*
Erro	22	0,013516
CV (%) :	1,89	
Média geral (mcar) ^{**} :	6,19	

* Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F.

** (mcar – metro de coluna de água residuária)

São apresentados, na Tabela 7, os valores médios de perda de carga avaliadas na tubulação adutora, em função da concentração de sólidos totais contidos na água residuária, bem como o percentual de acréscimo de cada tratamento em relação à água sem resíduo. Verifica-se que houve um acréscimo de até 30,12% na perda de carga para o tratamento de maior concentração de sólidos em relação à perda de carga do tratamento sem resíduo.

O gráfico da Figura 13 representa a correlação entre a perda de carga avaliada na linha adutora e as concentrações dos sólidos totais contidos na água residuária, com a respectiva equação ajustada, para as condições em que foi realizado este trabalho.

TABELA 7. Perda de carga na adutora em função da concentração de sólidos totais contidos na água residuária. CEFET, Uberaba, 2006.

Sólidos totais (mg L ⁻¹)	Perda de carga adutora	% de acréscimo
540(água)	5,35*	-
2453	5,41**	1,14
2913	5,66**	5,77
3725	5,83**	9,05
4755	6,00**	12,16
5033	6,05**	13,08
7094	6,30**	17,72
7542	6,31**	17,98
11335	6,58**	22,98
15538	6,71**	25,46
20513	6,81**	27,36
34169	6,96**	30,12

* (mca – metro de coluna de água) ** (mcar – metro de coluna de água residuária)

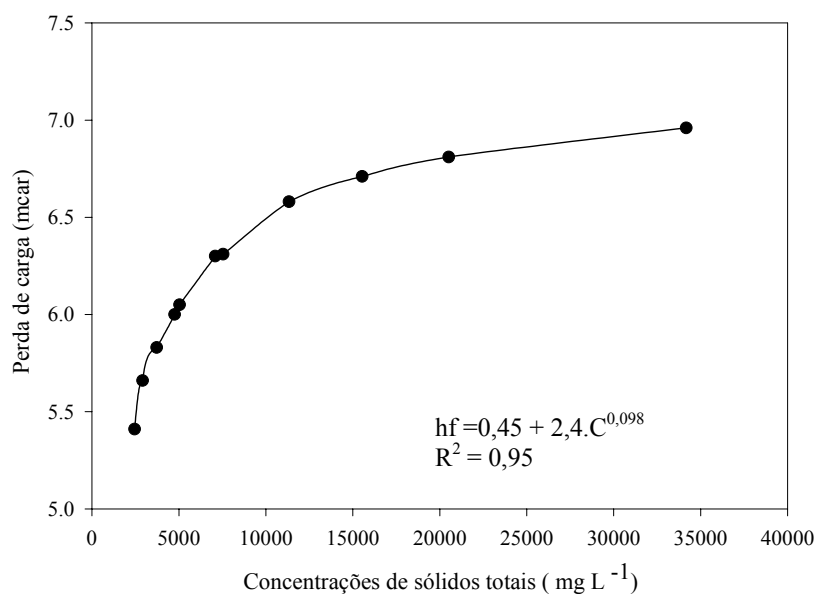


FIGURA 13. Representação gráfica da perda de carga na adutora, em função da concentração de sólidos totais. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Na Tabela 8 encontram-se os coeficientes de atrito “C” do modelo de Hazen-Williams modificado, apresentado por Sampaio (1999), ajustado à situação de rugosidade da tubulação utilizada nos ensaios. Observa-se um acréscimo neste valor para os tratamentos com menor concentração e posteriores decréscimos nos valores do coeficiente de atrito, para as maiores concentrações de sólidos.

TABELA 8. Coeficiente de atrito “C” do modelo Hazen-Williams modificado, apresentado por Sampaio (1999).

Concentração de sólidos totais (mg L ⁻¹)	Coeficiente de atrito
540(água)	83,0
2453	90,0
2913	83,5
3725	77,0
4755	72,5
5033	71,0
7094	66,0
7542	66,6
11335	66,2
15538	61,5
20513	60,0
34169	61,5

O valor encontrado para o tratamento sem resíduo na água é semelhante ao valor proposto por Azevedo Netto et al. (1998), para tubos com vinte anos de uso. Este fato é atribuído ao aumento da rugosidade interna na tubulação, provocada pela formação de nódulos. Para os demais tratamentos, a diminuição

pode ser atribuída ao aumento da rugosidade interna, provocada pela aderência de sólidos às paredes do tubo.

Sampaio (1999) encontrou diminuição nos valores do coeficiente de atrito (C) para tubos de aço, em função do aumento das concentrações sólidos totais contidos em água residuária de suinocultura e bovinocultura. Este autor atribuiu esta diminuição a formações de incrustações no interior da tubulação, principalmente na linha de solda interna do tubo.

4.5 Perda de carga média avaliada na turbina

Na Tabela 9 encontra-se o resumo da análise de variância para a perda de carga medida na turbina, em que verificou-se significância na análise, em função do valor do coeficiente de variação que mostra a precisão experimental.

TABELA 9. Resumo da análise de variância para a perda de carga na turbina. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Fonte de variação	G. L.	Quadrado médio
Blocos	2	0,026469
Tratamentos	11	0,408478*
Erro	22	0,019860
CV (%) :	1,37	
Média geral (mcar):	10,25	

* significativo, a 5 % de probabilidade, pelo teste F.

** (mcar – metro de coluna de água residuária)

Na Tabela 10 verificam-se os valores médios das perdas de carga determinadas na turbina e o percentual de acréscimo em relação ao tratamento

sem sólidos, podendo-se observar um acréscimo da perda de carga da ordem de 11,93% para o tratamento com maior concentração de sólidos totais.

Rocha (1998) relatou valor muito superior para a perda de carga provocada pela turbina; já Rocha (2000) relata valores semelhantes aos avaliados para a perda de carga provocada pela turbina ao operar com água.

TABELA 10. Perda de carga determinada na turbina. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Sólidos totais (mg L ⁻¹)	Perda de carga na turbina	% de acréscimo
540(água)	9,76*	-
2453	9,82**	0,58
2913	9,90**	1,44
3725	9,94**	1,81
4755	10,19**	4,41
5033	10,20**	4,53
7094	10,26**	5,17
7542	10,28**	5,37
11335	10,45**	7,03
15538	10,55**	8,10
20513	10,76**	10,28
34169	10,92**	11,93

* (mca: metro de coluna de água) ** (mcar: metro de coluna de água residuária)

4.6 Perda de carga média avaliada na mangueira

Na Tabela 11 encontra-se o resumo da análise de variância para a perda de carga avaliada na mangueira. Verifica-se que as variações são significativas nos dados e o valor de coeficiente de variação que mostra a precisão experimental.

No sistema autopropelido, a mangueira é responsável pelo movimento do carroaspersor que, ao ser enrolada, dá movimento ao mesmo. Por ser tracionada, a mangueira deve ser resistente e, para conferir-lhe resistência, as

paredes são espessas, diminuindo, assim, o seu diâmetro interno que, para transportar a vazão que sai pelo aspersor, provoca certa perda de carga.

TABELA 11. Resumo da análise de variância para a perda de carga na mangueira. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Fonte de variação	G. L.	Quadrado médio
Blocos	2	0,007503
Tratamentos	11	1,542408*
Erro	22	0,018763
CV (%):	1,19	
Média geral (mcar):	11,48	

* significativo, a 5 % de probabilidade, pelo teste F.

** (mcar: metro de coluna de água residuária)

Na Figura 14 é apresentado um modelo para estimativa da perda de carga na mangueira, em função da concentração de sólidos totais contidos na água residuária, a qual apresenta um alto coeficiente de determinação.

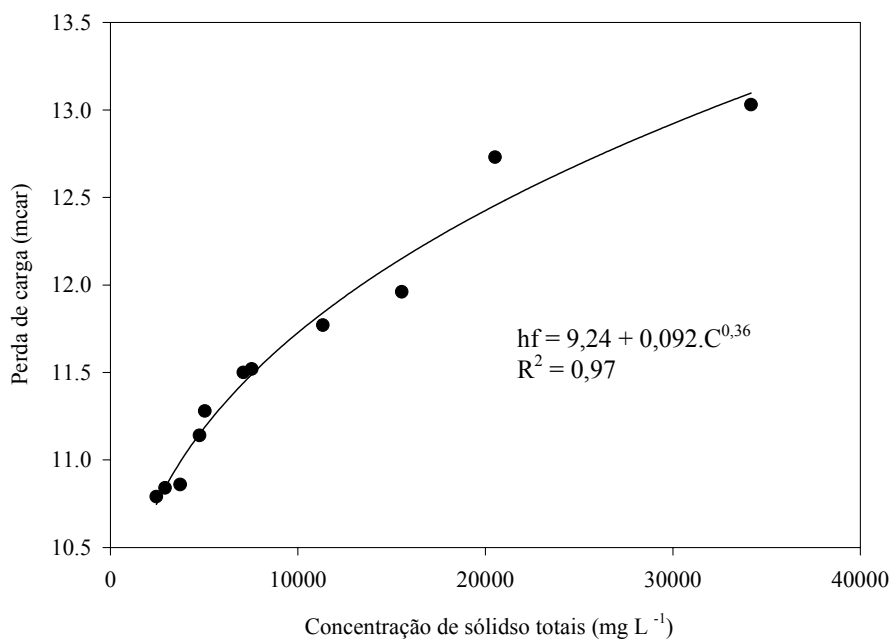


FIGURA 14. Representação gráfica da perda de carga na mangueira, em função da concentração de sólidos totais. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Na Tabela 12 estão apresentados os valores das perdas de carga avaliadas na mangueira, em função das concentrações de sólidos totais contidos em cada tratamento e o percentual de acréscimo desta em relação ao tratamento sem resíduo, observando-se um acréscimo de 20,55% no valor da perda de carga. O aumento nesta variável pode ser atribuído ao maior atrito entre as partículas e as paredes da tubulação e entre as próprias partículas.

TABELA 12. Perda de carga medida na mangueira, em função da concentração de sólidos totais em cada tratamento. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Sólidos totais (mg L ⁻¹)	Perda de carga na mangueira	% de acréscimo
540 (água)	10,69*	-
2453	10,80**	0,99
2913	10,84**	1,41
3725	10,86**	1,54
4755	11,14**	4,18
5033	11,28**	5,44
7094	11,49**	7,44
7542	11,51**	7,64
11335	11,74**	9,77
15538	11,92**	11,46
20513	12,66**	18,40
34169	12,89**	20,55

* (mca: metro de coluna de água) ** (mcar: metro de coluna de água residuária)

4.7 Uniformidade de distribuição

Na uniformidade de distribuição foram avaliados dois parâmetros: o coeficiente de uniformidade de Christiansen e a uniformidade de distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor.

4.7.1 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

Na Tabela 13 está apresentado o resumo da análise de variância para cada espaçamento simulado entre carregadores de irrigação. Pode-se observar que não houve influência significativa da concentração de sólidos totais no coeficiente de uniformidade de Christiansen. Observam-se, ainda, os valores dos coeficientes de variação, mesmo sendo um pouco maiores do que aqueles

apresentados para os outros parâmetros avaliados, eles revelam a precisão experimental.

TABELA 13. Resumo da análise de variância para o coeficiente de uniformidade de Christiansen e os espaçamentos entre as faixas de irrigação simulada. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Fonte de variação	G. L.	Q. M.				
		30	36	42	48	54
Blocos	2	1,36	94,16	100,75	7,20	71,67
Tratamentos	11	92,17 ^{ns}	99,49 ^{ns}	50,14 ^{ns}	20,78 ^{ns}	32,91 ^{ns}
Erro	22	83,44	48,49	43,11	30,92	50,03
Total	35					
Média		81,10	73,97	75,75	90,97	77,75
C V (%)		11,26	9,41	8,67	6,87	9,10

ns = não significativo, 30 = espaçamento (m) entre carregadores de irrigação.

Os coeficientes de uniformidade de Christiansen estão apresentados na Tabela 14, em que observam-se valores variando de 62% a 88%, tendo os menores valores sido encontrados para os espaçamentos 36 e 42 m. Observa-se, ainda, uma tendência de menores valores para todos os espaçamentos nas concentrações avaliadas de 2.913 e 3.725 mg L⁻¹. Este fato é atribuído às modificações de fluxo provocadas por estas concentrações.

Prado (2004), avaliando um sistema de irrigação com as mesmas características do equipamento avaliado neste trabalho, encontrou os menores valores de CUC para os espaçamentos 36 e 42 m.

Rocha (1998) encontrou valores de CUC variando de 71,94 a 83,67, ao trabalhar com pressões de até 25 mca e espaçamento entre faixa de irrigação com 50% e 70% da sobreposição do raio de alcance do aspersor. Já Rocha

(2000) encontrou valores para o CUC variando de 54,95, para simulação de largura de faixa irrigação igual a 100% do diâmetro molhado pelo aspersor e de 92,27 quando simulou espaçamento de 80%. Dessa forma, recomenda, ainda, espaçamento entre 70% e 80% do diâmetro molhado para uso deste tipo de equipamento.

TABELA 14. Coeficientes de uniformidade de Christiansen para diferentes espaçamentos entre faixas de irrigação simuladas. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Concentração de sólidos (mg L ⁻¹)	Espaçamento entre as faixas (m)				
	30	36	42	48	54
540(água)	87,10	72,01	70,05	78,66	84,95
2453	80,68	76,29	77,82	82,09	75,12
2913	85,09	74,90	72,05	79,51	79,65
3725	71,42	62,33	69,74	80,01	74,60
4755	72,34	70,91	80,89	83,76	73,08
5033	75,74	66,35	73,04	76,87	78,81
7094	83,58	74,59	76,39	83,02	79,43
7542	82,61	79,02	78,01	79,30	76,74
11335	80,29	76,00	78,01	82,22	77,04
15538	85,27	73,15	73,12	81,81	81,26
20513	80,25	77,80	77,57	78,35	74,79
34169	88,82	84,29	82,29	86,05	77,51

4.7.2 Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor

Na Figura 15 estão representadas as distribuições de sólidos totais e frações ao longo do alcance do aspersor, para o tratamento cuja concentração de sólidos totais foi de 34.169 mg L^{-1} . Observa-se que houve uma concentração de sólidos no coletor mais afastado do aspersor, o que foi atribuído ao peso específico da residuária. Isso porque, conforme a teoria da balística, maior massa resulta em acréscimo na velocidade de deslocamento, portanto, em maior distância alcançada pela partícula. Os resultados para as demais concentrações de sólidos totais são verificados nos gráficos das Figuras 1A a 11A, no Anexo.

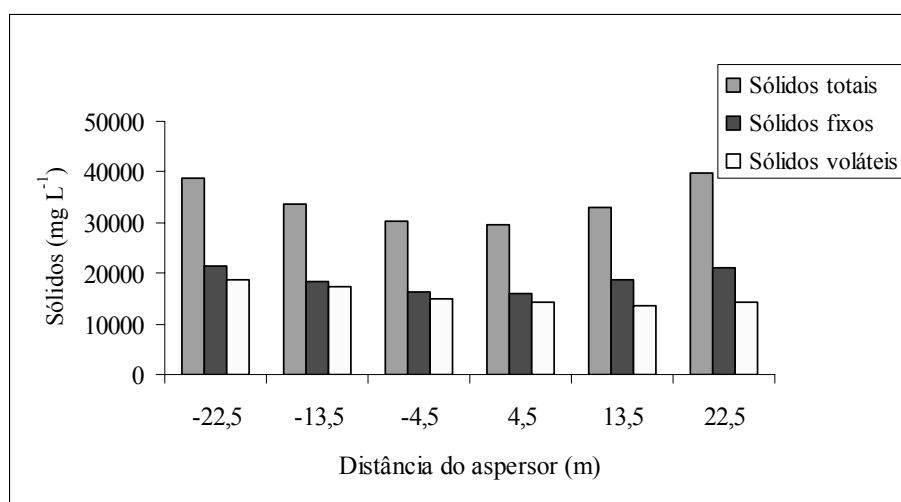


FIGURA 15. Distribuição de sólidos ao longo alcance do aspersor para o tratamento 34.169 mg L^{-1} . CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Em estudo da distribuição de gotas por aspersor montado em um sistema autopropelido, Rocha (1998) verificou concentração dos maiores diâmetros de gota semelhante à distribuição de sólidos da figura anterior.

4.8 Alcance do aspersor na faixa molhada

Na Tabela 15 estão apresentados os valores de alcance médio produzidos pelo aspersor, em função da concentração de sólidos totais no tratamento, não tendo ocorrido diferença significativa entre os tratamentos. Valores similares são apresentados por Prado (2004) para um aspersor, trabalhando com água sem resíduo.

TABELA 15. Alcance do aspersor em função da concentração de sólidos totais. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Concentração de sólidos totais (mg L ⁻¹)	Alcance (m)
540(água)	30,0
2453	30,1
2913	30,5
3725	30,0
4755	30,0
5033	30,1
7094	30,2
7542	30,5
11335	30,5
15538	30,5
20513	30,5
34169	31,0

O gráfico da Figura 16 representa o perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor para o tratamento 540 mg L⁻¹(água sem resíduo) e 34.169 mg L⁻¹,

em que pode-se observar uma semelhança entre os perfis. As diferenças entre os perfis podem ser explicadas pela diferença da massa específica da água e a água residuária.

Os demais perfis apresentam certa distorção provocada pelo vento, mesmo este estando abaixo dos limites recomendados pela norma e são apresentados nos gráficos das Figuras 1B a 11B, no Anexo.

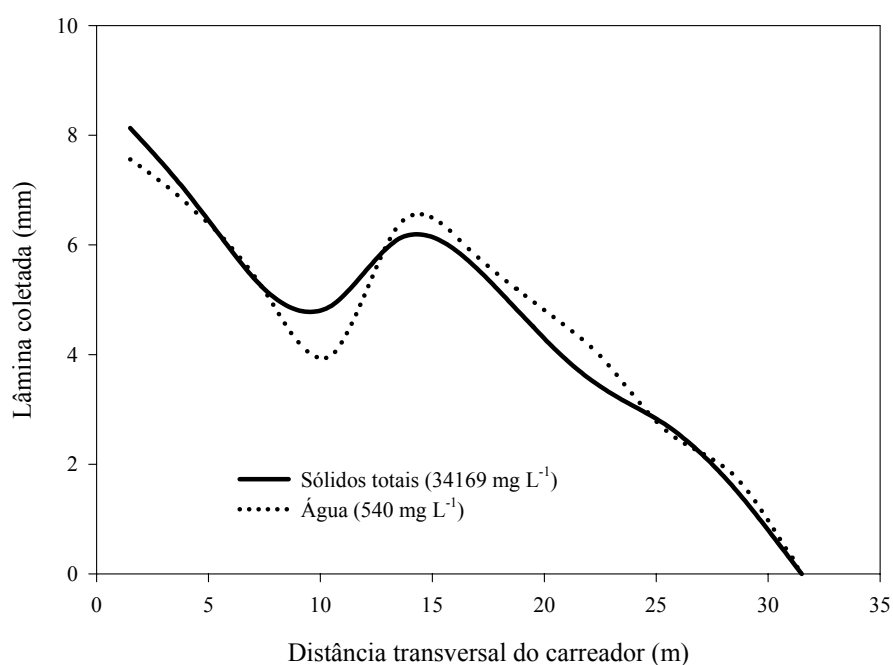


FIGURA 16. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

4.9 Rendimento da bomba

Na Tabela 16 são mostrados os valores de rendimento, bem como os decréscimos deste rendimento, com o aumento da concentração de sólidos. A concentração de sólidos totais contidos na água residuária influenciou no rendimento da bomba. Sendo a bomba de rotor semi-aberto, o seu rendimento é considerado baixo. Ainda assim, verifica-se um decréscimo de 9% neste rendimento para o tratamento de maior concentração em relação à água sem resíduo. A mesma tendência foi observada por Teixeira (1973), ao trabalhar com uma mistura de água e areia.

TABELA 16. Rendimento da bomba e seu decréscimo com o aumento da concentração de sólidos totais contidos na água residuária. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Concentração de sólidos totais (mg L ⁻¹)	Rendimento da bomba (%)	Decréscimo (%)
540(água)	44,0	-
2453	42,9	2,3
2913	42,5	3,3
3725	42,5	3,2
4755	42,4	3,5
5033	42,3	3,7
7094	42,3	3,7
7538	42,3	3,7
11335	41,4	5,8
15538	41,4	5,8
20513	40,5	7,9
34169	40,0	9,0

4.10 Potência exigida da rede elétrica pelo sistema

Na Tabela 17 encontra-se o resumo da análise de variância para a potência exigida da rede pelo sistema e da potência necessária no eixo da bomba. Verifica-se que as variações são significativas e o valor de coeficiente de variação mostra a precisão experimental.

TABELA 17. Resumo da análise de variância para a potência exigida da rede elétrica e a potência exigida no eixo da bomba. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Fonte de variação	G. L.	Q. M.	
		Potência exigida da rede elétrica	Potência exigida no eixo da bomba
Blocos	2	0,000478	0,000308
Tratamentos	11	0,127090*	0,105267*
Erro	22	0,000984	0,000369
Total	35		
Média		7,88	6,81
C V (%)		0,40	0,28

* significativo, a 5 % de probabilidade, pelo teste F.

Na Tabela 18 são apresentadas a potência exigida da rede elétrica pelo sistema, a potência exigida no eixo da bomba e os respectivos acréscimos de potência com o aumento da concentração de sólidos totais na água residuária. Pode-se observar um acréscimo de até 8,28% na potência exigida da rede elétrica e um acréscimo de potência exigida no eixo da bomba de 8,68% para o tratamento com maior concentração de sólidos totais.

TABELA 18. Acréscimo de potência exigida da rede elétrica, acréscimo de potência exigida no eixo do motor e acréscimos. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Concentração de sólidos totais (mg L ⁻¹)	Potência exigida da rede elétrica (cv)	Potência no eixo da bomba (cv)	Acréscimo na potência da rede elétrica (%)	Acréscimo na potência do motor (%)
540(água)	7,57	6,53	-	-
2453	7,64	6,58	1,01	0,71
2913	7,65	6,63	1,15	1,53
3725	7,73	6,68	2,16	2,30
4755	7,81	6,74	3,22	3,16
5033	7,83	6,79	3,48	3,93
7094	7,94	6,86	4,89	5,10
7538	7,97	6,89	5,29	5,56
11335	8,02	6,94	5,95	6,28
15538	8,06	6,98	6,56	6,94
20513	8,14	7,05	7,62	8,01
34169	8,19	7,10	8,28	8,68

Na Tabela 19 estão apresentados os acréscimos de potência do motor necessários para acionamento do sistema em relação às potências exigidas no eixo da bomba para cada tratamento. Observa-se um acréscimo médio para todas as concentrações de sólidos totais próximo de 15%, o que concorda com recomendação de Carvalho (2004).

Soccol (1996), trabalhando com bombeamento de dejetos de líquido de suíno com concentrações de sólidos totais de até 8%, concluiu que houve um decréscimo no rendimento da bomba, recomendando um acréscimo de 20% no cálculo da potência do motor, independente da concentração de sólidos.

TABELA 19. Acréscimo de potência exigida no eixo motor em relação à potência exigida da rede elétrica. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Concentração de sólidos totais (mg L ⁻¹)	Potência exigida da rede elétrica (cv)	Potência no eixo da bomba (c.v.)	Acréscimo na potência (%)
540(água)	7,57	6,53	15,93
2453	7,64	6,58	16,11
2913	7,65	6,63	15,38
3725	7,73	6,68	15,72
4755	7,81	6,74	15,88
5033	7,83	6,79	15,32
7094	7,94	6,86	15,74
7538	7,97	6,89	15,67
11335	8,02	6,94	15,56
15538	8,06	6,98	15,47
20513	8,14	7,05	15,46
34169	8,19	7,10	15,35

4.11 Síntese dos resultados

O parâmetro físico peso específico verificado nos tratamentos não difere significativamente daqueles encontrados na literatura e a utilização de um medidor de vazão calibrado para medir vazão de água sem resíduo não influenciou nos resultados deste trabalho.

As perdas de carga nos vários componentes do sistema foram diretamente influenciadas pela concentração de sólidos na água residuária de suinocultura. Isso permite a comparação com modelos propostos na literatura, nos quais verifica-se a necessidade de adequação do coeficiente de atrito para o cálculo da perda de carga em tubulações de aço zincado usadas.

A concentração de sólidos totais contidos nos diferentes tratamentos não influenciou o coeficiente de uniformidade de Christiansen e nem no alcance do aspersor.

O perfil de distribuição de água residuária foi semelhante à distribuição de água sem sólidos, porém, próximo do aspersor para água com sólidos, este perfil foi menos acentuado.

A dispersão de sólidos totais ao longo do raio de alcance do aspersor não foi uniforme, acarretando em acúmulo de sólidos na extremidade de alcance para a maioria das concentrações.

O rendimento da bomba foi diretamente influenciado pela concentração de sólidos totais contidos nos tratamentos, tendo uma redução de 9% em comparação ao tratamento sem resíduo.

Houve um aumento na exigência de potência da rede elétrica por parte do sistema, com o aumento da concentração de sólidos totais contidos em cada tratamento, com valores de até 8,28% de acréscimo desta potência para a maior concentração.

5 CONCLUSÕES

1. A perda de carga nos componentes que compõem o sistema de irrigação autopropelido foi influenciada pela concentração de sólidos totais. Deve-se considerar o valor correto do coeficiente de atrito “C” para a tubulação em uso, levando em consideração o modelo de Hazen-Williams modificado.
2. Não foram observadas diferenças significativas entre os coeficientes de uniformidade de Christiansen em função da concentração de sólidos totais contidos na água residuária de suinocultura.
3. Foi observada maior concentração de sólidos no extremo do raio de alcance do aspersor. Portanto, uma distribuição desuniforme, devido ao peso específico do material, faz com que ocorra uma maior velocidade resultante das gotas.
4. O rendimento da bomba foi diretamente influenciado pela concentração de sólidos totais, tendo um decréscimo no rendimento de 9% para a maior concentração em relação ao tratamento sem sólidos.
5. A demanda de potência pelo sistema foi aumentada em função do aumento da concentração de sólidos totais na água residuária de suinocultura, chegando a um acréscimo de 8,28% e 8,68% na potência absorvida da rede elétrica pelo sistema e no eixo da bomba, respectivamente.

6 RECOMENDAÇÕES

1. Novos estudos deverão ser realizados para determinar o coeficiente de atrito em outros tipos de tubos que constituem a linha adutora. Também as perdas de carga deverão ser avaliadas em outros modelos de turbina e de mangueira que compõem o sistema, determinando também as equações correspondentes.
2. Realizar novos estudos para verificar a distribuição de sólidos ao longo do perfil de distribuição do aspersor e a uniformidade de distribuição de sólidos por parte do sistema.
3. Avaliar a influência de maiores concentrações de sólidos no rendimento da bomba e o rendimento de outros modelos de bomba operando com água residuária de suinocultura.
4. Determinar a exigência de potência da rede elétrica para maiores concentrações de sólidos totais contidos em água residuária de suinocultura.
5. Correlacionar a viscosidade das várias concentrações de sólidos totais contidos na água residuária de suinocultura com o rendimento da bomba e a exigência de potência da rede elétrica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANUALPEC 2006 – Anuário da Pecuária Brasileira. São Paulo: Instituto FNP, 2006. 369 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Águas - Determinação de resíduos (Sólidos) – Método gravimétrico: NBR 10664**. Rio de Janeiro, 1989. 7 p.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F.; ARAÚJO, R. de; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5. ed. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1989. 596 p.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n.º 357 de 17 de março de 2005. Dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: abr. 2006.

CARVALHO, J. A. **Captação, elevação e condução de água**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 231 p.

CHARMELO, L. L. C. **Desempenho de um sistema de irrigação autopropelido sob diferentes condições operacionais**. 1990. 50 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CHEN, Y. R.; HASHIMOTO, A. G. Rheological Properties of Aerated Poultry Waste Slurries. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.19, n.1, p.128-133, 1976.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkler**. Berkeley: Califórnia Agricultural Station, 1942. 124 p.

CLEPS JÚNIOR, J.; PELEGRINI, D. F. **O programa de integração da Rezende/Sadia no triângulo mineiro e Alto Paranaíba no contexto das transformações na suinocultura brasileira**. Uberlândia: UFU, 2001.15 p.

DARTORA, V.; PERDOMO, C. C.; TUMELERO, I. L. **Manejo de dejetos de suínos**. Concórdia: Embrapa-CNPSA, 1998. 33 p. (Embrapa-CNPSA. Bipers 11).

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. 346 p.

DRUMOND, L. C. D.; ZANINI, J. R.; FERNANDES, A. L. T.; RODRIGUES, G. P. Uniformidade de distribuição superficial e subsuperficial de água e de água residuária de suinocultura com irrigação por aspersão em malha. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 415-425, maio/ago. 2006.

DUFFY, G. G. A Review and Evaluation of Design Methods for Calculating Friction Loss in Stock Piping Systems. **Tappi**, Atlanta, v. 59, n. 8, p.124-127, Aug. 1976.

FERREIRA, D. F. **Sisvar**. Versão 4.3. Lavras: UFLA/DEX, 1999. 1CD-ROM.

FOX, R. W.; McDONALD A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara-Koogan, 1985. 632 p.

HERUM, F. L.; ISAACS, G. W.; PEART, R. M. Flow Properties of Highly Viscous Organic Pastes and Slurries. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.10, n.2, p.45-51, 1966.

HUGHES, W. F.; BRIGHTON, J. A. **Dinâmica dos fluidos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1974. 358 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. ISO-7749/2. **Irrigation equipament – Rotating sprinklers** – Part. 2: Uniformity of distribution and test methods. Switzerland, 1990. 8 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. ISO-8224/1. **Traveller irrigation machines** – Part. 1: Laboratory and field test methods, Switzerland, 2003. 35 p.

KAMAND, F. Z. Hydraulic Friction Factors for Pipe Flow. **Journal of the irrigation and drainage division**, New York, v. 114, n. 2, p. 311-323, May 1988.

KHOL, R. A. Drop size distribution from medium sized agricultural sprinkler. **Transactions of ASAE**, St Joseph, v.17, n. 4, p. 690-693, 1974.

KONZEN, E. A. **Aproveitamento de dejetos líquido de suínos para fertirrigação e fertilização de grandes culturas**. Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 2003a. 11 p. (Embrapa-CNPMS. Circular Técnica, 32).

KONZEN, E. A. **Fertilização de lavoura e pastagem com dejetos de suínos e cama de aves**. Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 2003b. 10 p. (Embrapa. CNPMS. Circular Técnica, 31).

KUMAR, M.; BARTELETT, H. D.; MOHSENIN, N. N. Flow properties of animal waste slurries. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.15, n.3/4, p.718-722, 1972.

MINAS GERAIS. Deliberação normativa COPAM nº 010/86. **Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamento de efluentes nas coleções de água e dá outras providências**. Minas Gerais, Belo Horizonte, p.13-15, 1987.

OLIVEIRA, P. A. V. (Coord). **Manual de manejo e utilização de dejetos de suínos**. Concórdia: Embrapa-CNPSA, 1993. 188 p. (Embrapa-CNPSA. Documento, 27).

OLIVEIRA, P. A. V. **Produção e manejo de dejetos de Suínos**. Concórdia: Embrapa – CNPSA, 2002. 18 p. (Embrapa – CNPSA).

PAIR, C. H. Water distribution under sprinkler irrigation. **Transaction of the ASAE**, St Joseph, v.11, n.5, p. 648-651, Sept./Oct. 1968.

PRADO, G do. **Simulasoft**. Versão 2.1. Lavras: UFLA/DEG, 2004. 1CD-ROM.

ROCHA, F. A. **Desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido em condições de campo**. 2000. 80 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ROCHA, W. W. **Influência de ângulos setoriais e pressão de serviço na uniformidade de distribuição de água de um equipamento autopropelido**. 1998. 46 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ROSA, J. A. **Avaliação do desempenho de um sistema de irrigação microautopropelido em diferentes condições de operação.** 1986. 72 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SAMPAIO, S. C. **Perda de carga em tubulações comerciais utilizando como fluido circulante águas residuárias da bovinocultura e suinocultura.** 1999. 168 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SEGINER, I. Tangential velocity of sprinkler drops. **Transactions of ASAE**, St Joseph, v. 8, n. 1, p. 90-93, 1965.

SIGMAPLOT 2000 for Windows, version 6.0, SPSS, 2000. 1CD-ROM.

SOCCOL, J. O. **Desempenho de bomba centrífuga operando com esterco suíno líquido.** 1996. 70 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TARJUELO, J. M. **El riego por aspersión y su tecnología.** 3. ed. rev. y ampl. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. 581 p.

TEIXEIRA, H. A. **Influência da concentração de areia nas curvas características das bombas centrifugas.** 1973 43 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

TOMAZELA, C. **Otimização do uso do aspersor tipo canhão em função das características operacionais e velocidade média do vento.** 1996. 59 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

VILELA, L. A. A. **Avaliação do impacto de gotas sobre a superfície de um latossolo vermelho escuro irrigado por aspersão.** 1995. 76 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

VILELA, L. A. A. **Irrigação por autopropelido e pivô central.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1999. 88 p.

8 ANEXOS

8.1 Anexo A

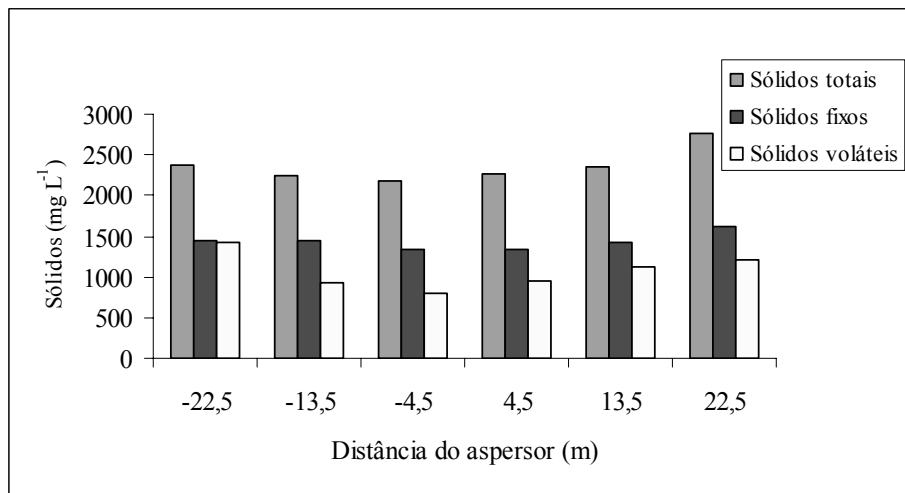


FIGURA 1A. Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor para o tratamento 2.453 mg L⁻¹. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

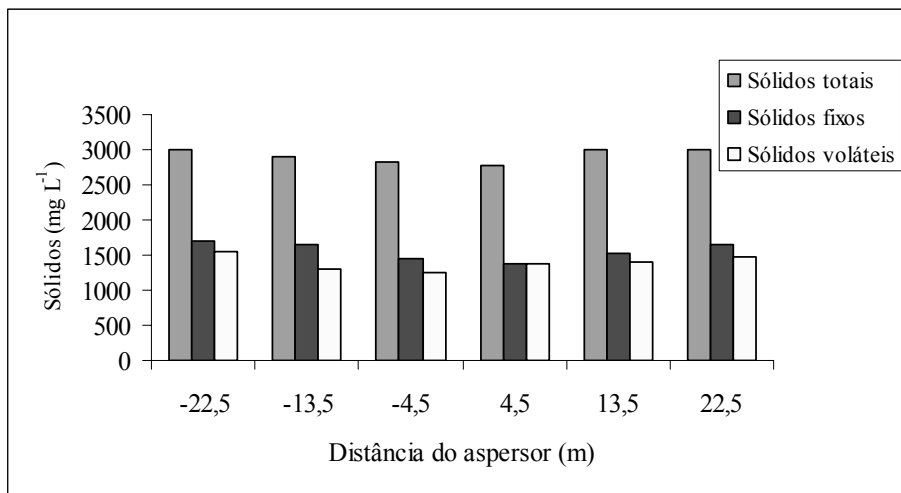


FIGURA 2A. Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor para o tratamento 2.913 mg L⁻¹. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

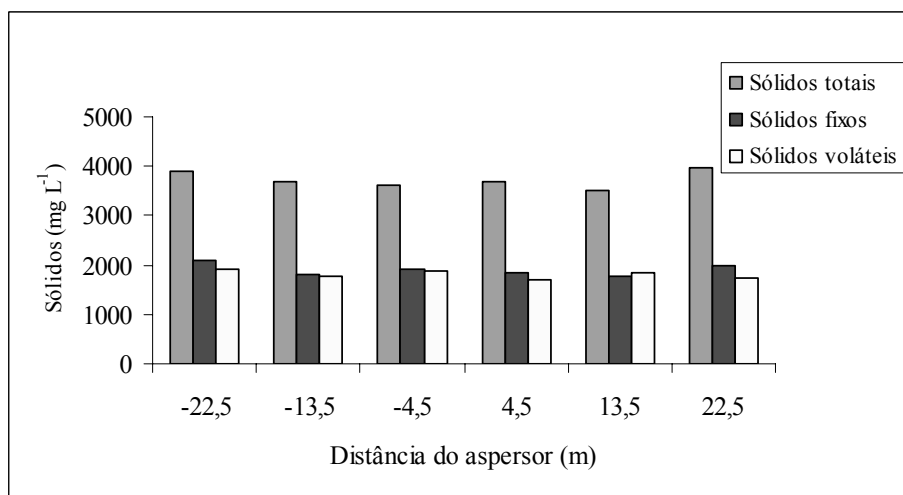


FIGURA 3A. Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor para o tratamento 3.725 mg L⁻¹. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

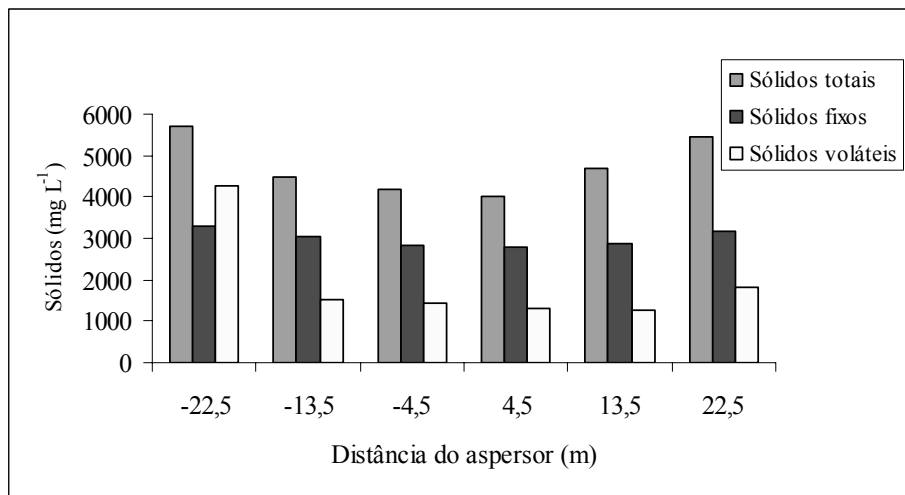


FIGURA 4A. Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor para o tratamento 4.755 mg L⁻¹. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

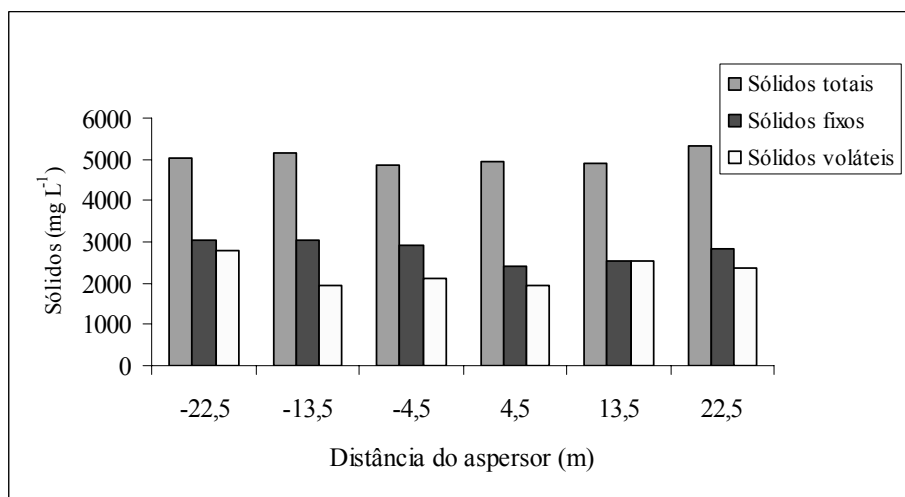


FIGURA 5A. Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor para o tratamento 5.033 mg L⁻¹. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

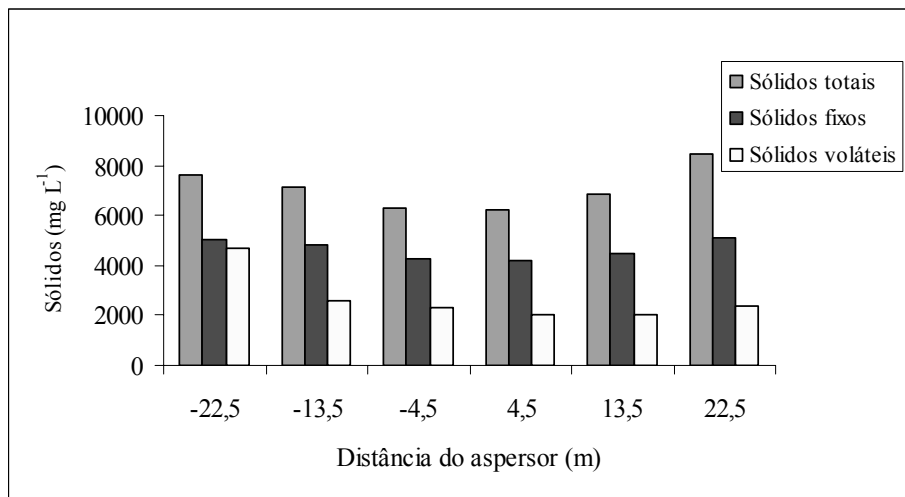


FIGURA 6A. Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor para o tratamento 7.094 mg L⁻¹. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

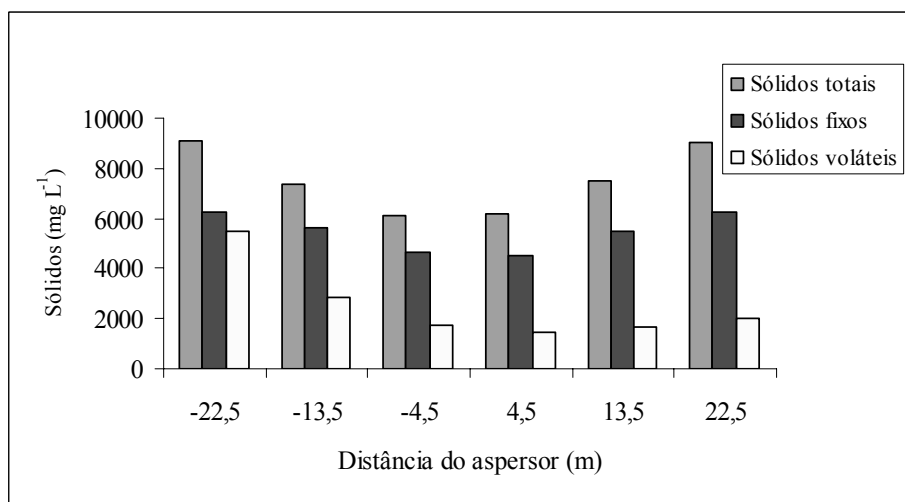


FIGURA 7A. Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor para o tratamento 7.542 mg L⁻¹. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

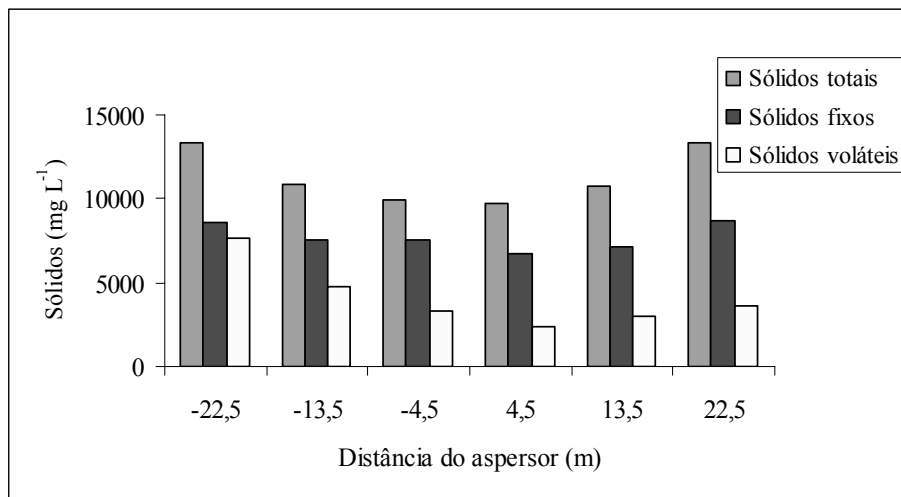


FIGURA 8A. Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor para o tratamento 11.335 mg L⁻¹. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

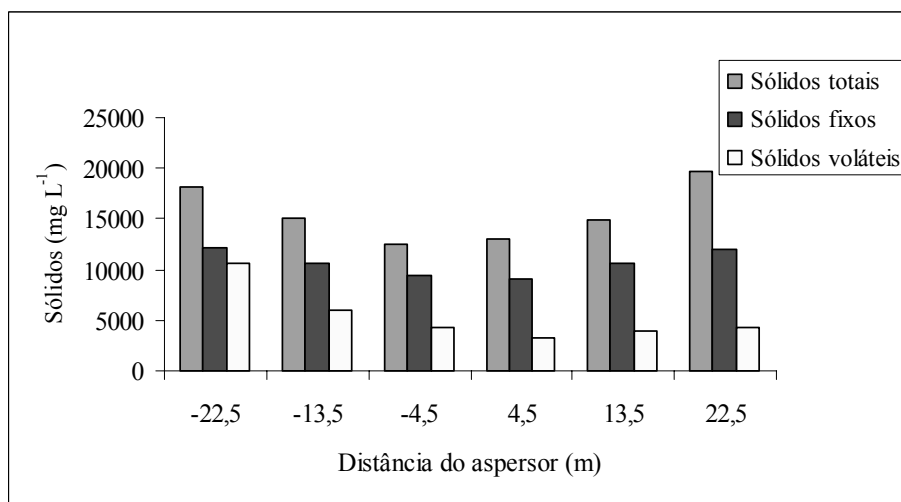


FIGURA 9A. Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor para o tratamento 15.538 mg L⁻¹. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

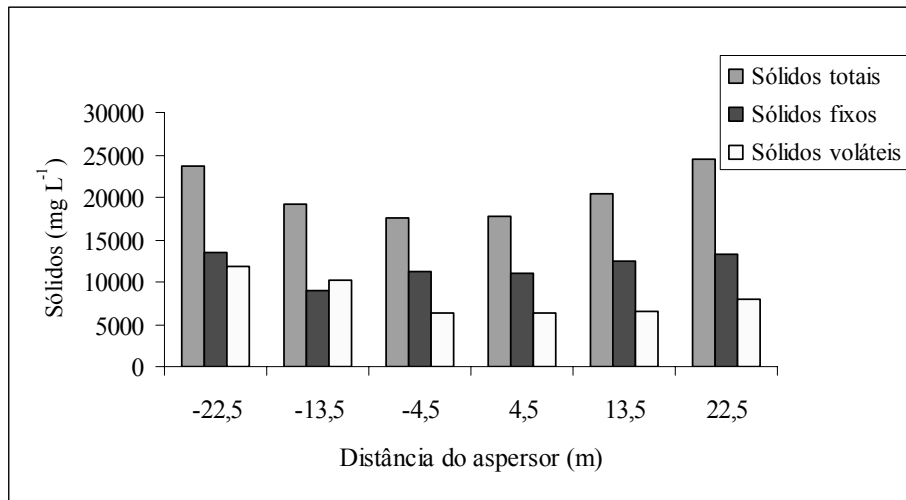


FIGURA 10A. Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor para o tratamento 20.513 mg L⁻¹. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

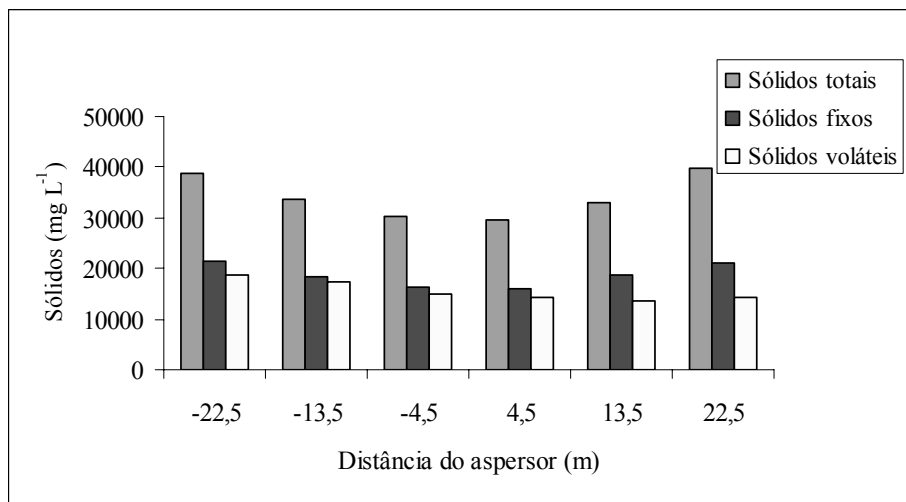


FIGURA 11A. Distribuição de sólidos ao longo do alcance do aspersor para o tratamento 34.169 mg L⁻¹. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

8.2 Anexo B

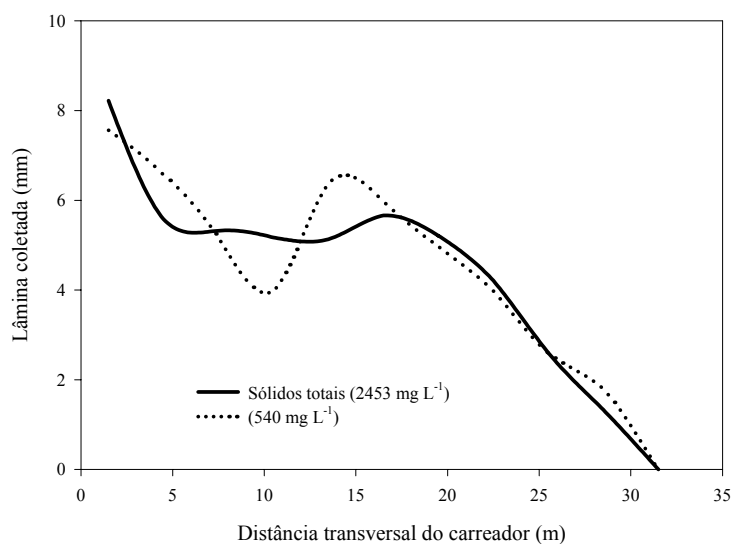


FIGURA 1B. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

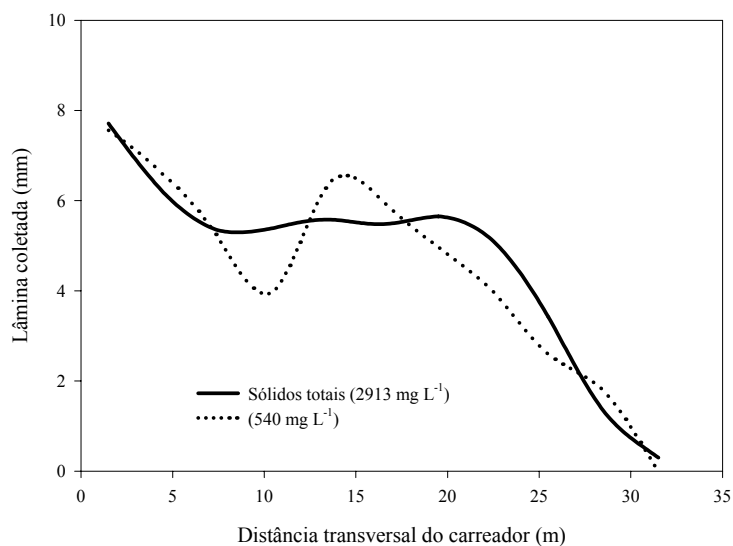


FIGURA 2B. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

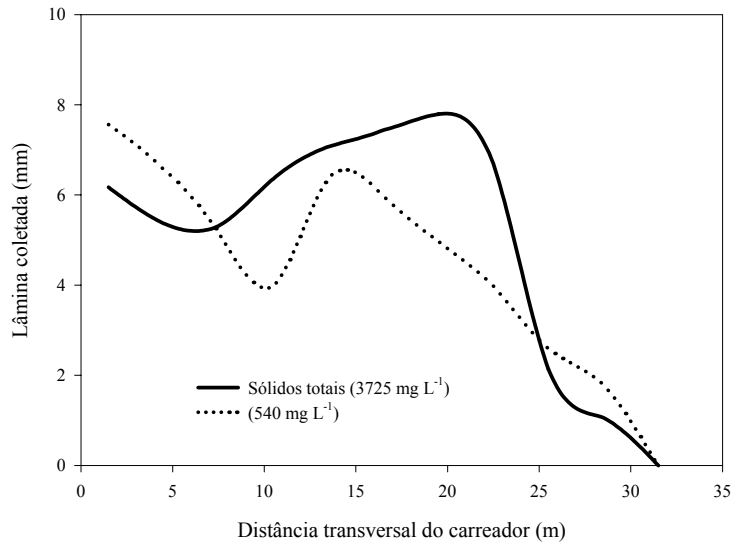


FIGURA 3B. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

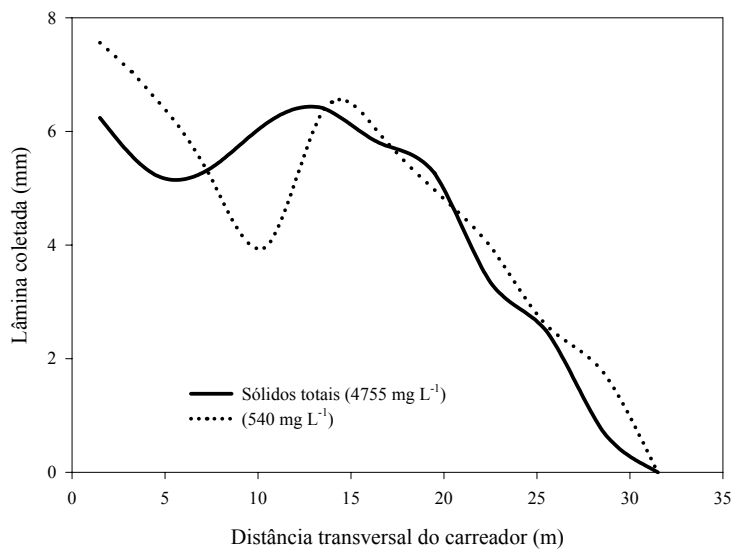


FIGURA 4B. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

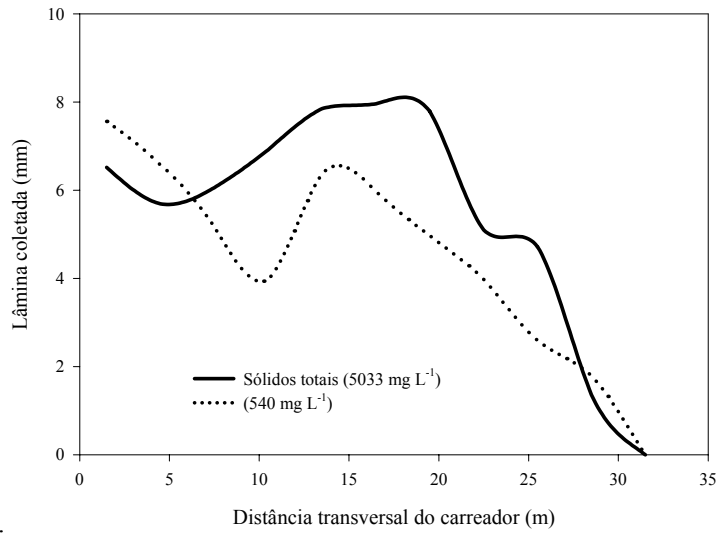


FIGURA 5B. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

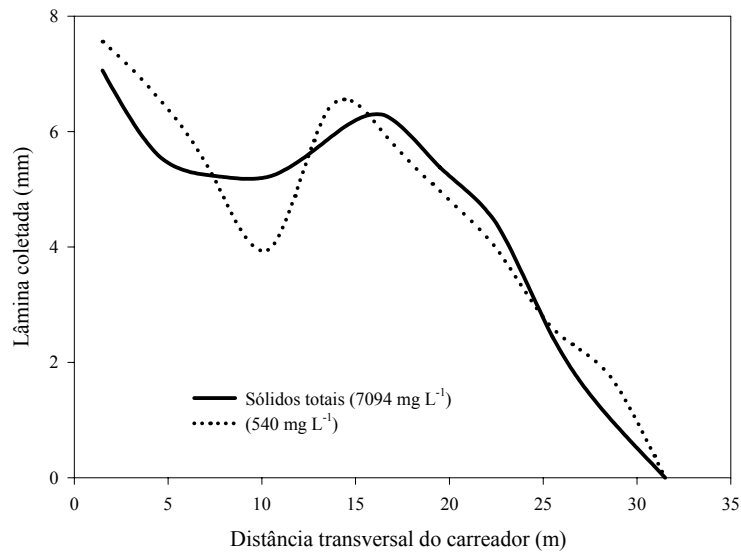


FIGURA 6B. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

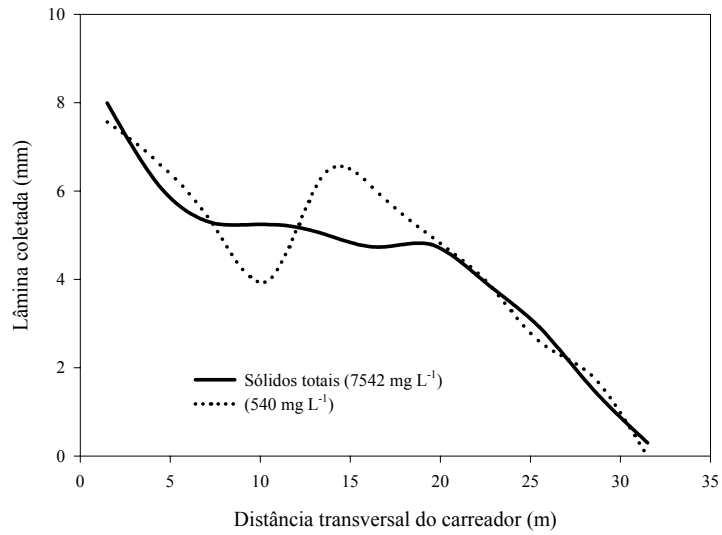


FIGURA 7B. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

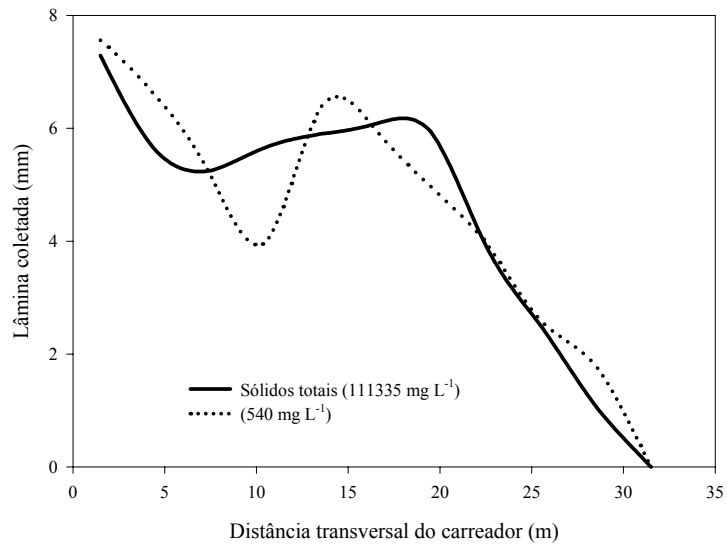


FIGURA 8B. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

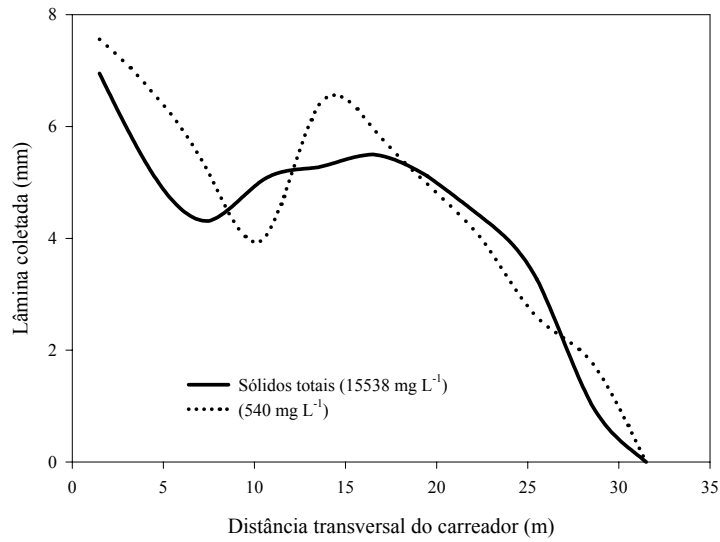


FIGURA 9B. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

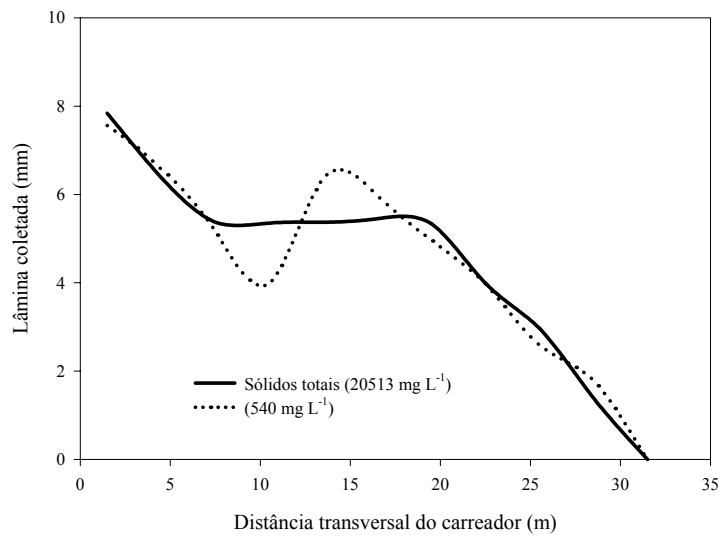


FIGURA 10. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

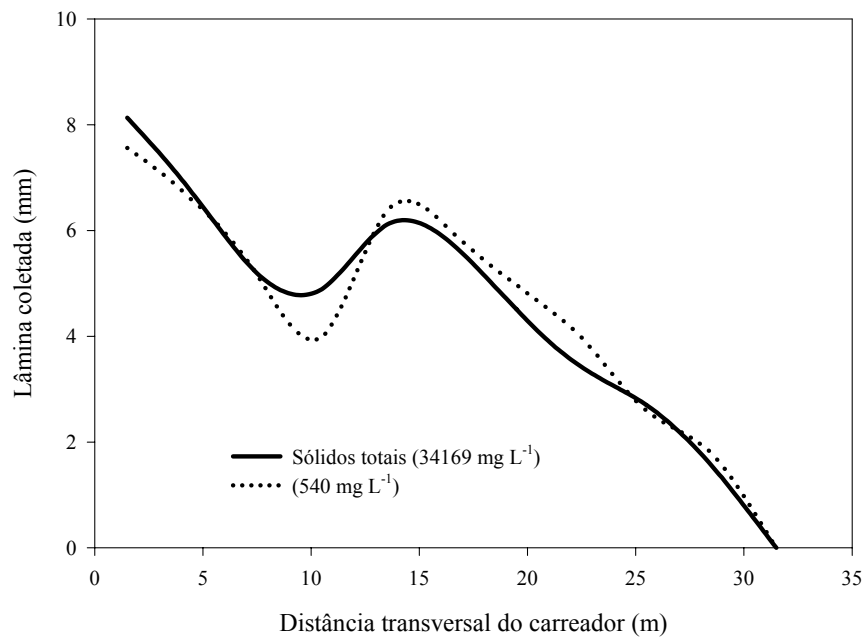


FIGURA 11B. Representação gráfica do perfil móvel de aplicação de água pelo aspersor. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

8.3 Anexo C

TABELA C1. Pressão avaliada em cada tomada de pressão. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Tratamento (mg L ⁻¹)	Pressão (kgf cm ²)				
	T1	T2	T3	T4	T5
540	6,19	5,29	4,32	4,31	3,46
	6,19	5,29	4,29	4,29	3,42
	6,14	5,24	4,26	4,26	3,41
2453	6,01	5,09	4,09	4,08	3,22
	5,99	5,08	4,09	4,09	3,20
	5,97	5,08	4,09	4,06	3,20
2913	5,99	5,08	4,09	4,06	3,19
	6,02	5,08	4,09	4,07	3,20
	6,05	5,12	4,09	4,10	3,22
3725	6,06	5,11	4,09	4,09	3,22
	6,04	5,09	4,10	4,08	3,20
	6,03	5,09	4,09	4,07	3,20
4755	6,10	5,14	4,10	4,12	3,21
	6,08	5,12	4,09	4,09	3,20
	6,08	5,11	4,09	4,09	3,20
5033	6,12	5,16	4,12	4,11	3,20
	6,11	5,14	4,12	4,11	3,20
	6,12	5,15	4,12	4,11	3,20
7094	6,17	5,18	4,13	4,13	3,21
	6,12	5,14	4,13	4,09	3,16
	6,20	5,19	4,14	4,14	3,18
7538	6,19	5,18	4,14	4,14	3,20
	6,15	5,17	4,13	4,13	3,20
	6,19	5,21	4,16	4,16	3,22
11335	6,17	5,14	4,09	4,07	3,11
	6,18	5,16	4,08	4,08	3,12
	6,16	5,14	4,09	4,08	3,12
15538	6,19	5,16	4,08	4,08	3,10
	6,20	5,17	4,09	4,09	3,12
	6,18	5,14	4,08	4,08	3,10
20513	6,19	5,14	4,05	4,05	3,00
	6,19	5,14	4,07	4,04	2,98
	6,19	5,14	4,04	4,04	2,98
34169	6,19	5,13	4,01	4,01	2,90
	6,19	5,11	4,01	3,99	2,90
	6,15	5,12	4,01	4,01	2,96

TABELA C2. Tensão e corrente média para cada observação. CEFET, Uberaba, MG, 2006.

Tratamento (mg L ⁻¹)		Observação			
		I	II	III	IV
540	Tensão (V)	212	212	212	211
	Corrente (A)	22,9	23,0	22,9	22,8
2453	Tensão (V)	213	212	211	211
	Corrente (A)	23,3	23,4	23,2	23,1
2913	Tensão (V)	213	212	212	212
	Corrente (A)	22,6	23,3	23,5	22,6
3725	Tensão (V)	212	211	212	211
	Corrente (A)	23,2	23,1	23,3	23,1
4755	Tensão (V)	212	212	211	210
	Corrente (A)	22,8	22,6	22,7	22,6
5033	Tensão (V)	210	209	209	210
	Corrente (A)	23,2	23,2	23,1	23,2
7094	Tensão (V)	213	212	212	212
	Corrente (A)	23,3	23,3	23,5	23,3
7538	Tensão (V)	211	212	212	212
	Corrente (A)	24,23	24,1	24,2	24,0
11335	Tensão (V)	210	211	210	211
	Corrente (A)	24,5	24,2	24,6	24,5
15538	Tensão (V)	211	212	211	211
	Corrente (A)	24,6	24,5	27,7	24,6
20513	Tensão (V)	211	210	210	211
	Corrente (A)	24,8	24,9	25,0	24,8
34169	Tensão (V)	212	210	210	210
	Corrente (A)	25,2	25,3	25,4	25,3